



Caractérisation, estimation et valorisation de gisements d'argiles kaoliniques du bassin des Charentes

Mohammad Koneshloo

► To cite this version:

Mohammad Koneshloo. Caractérisation, estimation et valorisation de gisements d'argiles kaoliniques du bassin des Charentes. Sciences de l'ingénieur [physics]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007. Français. NNT : 2007ENMP1486 . tel-00199226

HAL Id: tel-00199226

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00199226>

Submitted on 18 Dec 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CARACTERISATION, ESTIMATION ET VALORISATION DE GISEMENTS D'ARGILES KAOLINIQUES DU BASSIN DES CHARENTES

à ma famille

Remerciements

Il m'est agréable d'exprimer ici ma reconnaissance à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Michel Duchêne, mon directeur de thèse. Je lui suis extrêmement reconnaissant pour sa patience, ses conseils avisés et son soutien en toutes circonstances.

Je remercie également Jean-Pierre Rolley, qui a accepté de s'engager dans la co-direction de cette thèse, et Marc Vinches en tant qu'encadrant de cette thèse.

Je souhaite ensuite faire part de ma gratitude envers les rapporteurs et membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail en acceptant de le lire et de l'évaluer.

Jack-Pierre Piguet, Directeur de l'Ecole des Mines de Nancy a accepté d'être rapporteur malgré un emploi du temps chargé.

Frédéric Villières, Directeur de Recherche au CNRS du Laboratoire Environnement et Minéralurgie (Ecole Nationale Supérieure de Géologie) m'a fait l'honneur d'être rapporteur. Son avis expérimenté m'est précieux.

Je remercie également Jean-Marc Veran, Directeur de la stratégie et du développement de la société AGS-Minéraux, premier producteur européen d'argile kaolinique et chamotte, pour avoir participé au jury et pour m'avoir accueilli au sein de la société AGS-Minéraux.

Je tiens à remercier Didier Moreau, Jean-Luc Menaud, Patric Dubois, et tous les membres du bureau d'étude et du bureau d'exploitation d'AGS pour toute l'aide qu'ils m'ont apportée, sous forme de discussions enrichissantes, de visites de carrières ou de conseils.

Je remercie Pierre Gaudon pour s'être intéressé avec enthousiasme à mon travail, de m'avoir offert l'opportunité d'étudier la minéralogie des kaolins et des chamottes, et pour la relecture et les corrections des quatre premiers chapitres.

Je voudrais remercier tous les professeurs du Centre de Géostatistique qui m'ont ouvert les yeux sur les méthodes géostatistiques pendant la formation CFSG (2005-2006). J'adresse mes plus vifs remerciements à Jean-Paul Chilès, Directeur du centre de géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris, qui m'a guidé au long de mes études au CFSG et jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Ses qualités à la fois scientifiques et humaines ont été autant d'atouts pour mener à bien cette étude.

Je suis reconnaissant envers Gaëlle LeLoc'h, responsable et Nathalie Dietrich secrétaire du CFSG, pour leur aide et leurs renseignements.

Je remercie également Jean-Michel Negroni pour toutes nos discussions autour des argiles kaoliniques des Charentes. Son avis expérimenté m'est précieux.

Je remercie Philippe Weber et Hossein Ahmadzadeh responsables des relations internationales de l'Ecole des Mines d'Alès.

La réalisation de cette thèse a été rendue possible grâce à la contribution d'un grand nombre de personnes qui m'ont permis de disposer des données nécessaires pour ce travail. Geovariances m'a permis d'utiliser le logiciel d'ISATIS, pour réaliser les études géostatistiques. J'aimerais leur exprimer ici ma reconnaissance. Je voudrais remercier François Geffroy pour ses réponses à mes questions et ses renseignements.

L'équipe du CMGD m'a accueilli cordialement. Merci à tous ceux qui m'ont fait partager leur expérience, qui ont donné de leur temps, de leur énergie et de leur patience pour m'aider.

Merci à mes collègues doctorants ou ex-doctorants avec qui j'ai traversé ces années au CMGD et au CG. Ils m'ont aidé sans compter, encouragé, et m'ont offert de bons moments : Nicolas Cabane, Rodolphe Sonnier, Adnan El-Aidi, Mathilde Noel, Rémy Vie, Andrea Davidovic, Marie Lefranc, Mathieu Woillez, Ali Rafiie et son épouse Parisa, Adamah Messan, Vie Wang, Cinausero Nicolas, Habib Lajili, Stéphanie Gairoard, Jean-Sébastien Dupuy, Vincent Berthe, Julien Bongono.

Mes remerciements vont également à mes amis iraniens qui m'ont fait partager leur expérience, qui ont donné de leur temps, de leur énergie, Ali Zamanifard, Mohammad Neyestani, Ghasem Shiri, Abolghasem Alighardashi, Vahid Sohrabi, Mohsen Nosrat-Abadi, Ali-Reza Rahim, Shahrokh Shahsavari.

Je tiens à remercier Dewey Moore, Elan Galan, Médard Thiry, Carlos Petter, Jao-Felipe Costa et Redrigo Peroni pour leurs correspondances et pour avoir consacré leur temps à répondre à mes questions.

Ayant souvent été maladroit pour les démarches administratives françaises, j'exprime ma gratitude à Mmes Sandrine Motte, Michele Brun, Sylvie Cruvellier, Madeleine Jourdan, Marie-Claude Bastok, Dominique Vassiliadis, Marie-Philomène Petitimberty et France Laminscarre.

Je tiens à remercier mes deux voisins de bureau Pierre Adamiec et Didier Nectoux, pour les conversations amicales que j'ai eues avec eux.

Je souhaite également remercier toutes les personnes que je n'ai pas encore citées mais qui ont néanmoins répondu à mes interrogations, m'ont conseillé, se sont rendues disponibles pour m'aider ou m'ont simplement soutenu dans cette entreprise de longue haleine. Que ceux que j'ai oubliés me pardonnent.

À ma famille et mes amis, qui ont fait preuve de beaucoup de patience et de résignation et qui m'ont donné le courage de mener ce travail à son terme.

Résumé

Des argiles kaoliniques sont exploitées depuis une centaine d'années, dans la partie occidentale du bassin des Charentes. Leurs dépôts sont liés aux formations sédimentaires d'un réseau paléo-deltaïque. La genèse des gisements de kaolin du Bassin des Charentes obéit à des règles géologiques simples mais leur géométrie détaillée présente une grande complexité, renforcée par le fait qu'on doit distinguer des argiles de qualités très différentes.

Les gisements récemment mis en exploitation, sont relativement plus riches en alumine que ceux déjà épuisés. Ces nouveaux gisements, plus profonds que les anciens, ont subi des phénomènes post-sédimentaires plus intenses. Dans cette étude on compare des données chimiques des différents gisements de Bassin des Charentes. La formation des argiles hyperalumineuses est particulièrement étudiée.

On essaie d'améliorer la connaissance des gisements en utilisant les analyses statistiques. Les données disponibles sont les résultats d'analyses chimiques des échantillons carottés des argiles kaoliniques.

Des méthodes géostatistiques sont proposées pour l'étude de ces gisements et sont appliquées à certains d'entre eux. Les problèmes de l'utilisation des outils de la géostatistique pour ce genre de dépôt sont abordés et on essaie de présenter des démarches adaptées.

Ces outils nous permettent de mettre en évidence l'importance d'une connaissance de la variabilité spatiale des éléments chimiques dans ce gisement pour mieux gérer les opérations d'exploration, d'extraction et de classification des dépôts de kaolin.

Des simulations géostatistiques permettent de visualiser la variabilité spatiale des différentes catégories d'argile. Elles ont été mises en œuvre dans le cadre de la méthode des plurigaussiennes seuillées. Deux cas ont été traités : simulation de faciès argileux fondés principalement sur des critères visuels, et simulation de classes d'argile définies à partir de leur teneur en Al_2O_3 .

Mots clé : Kaolin, Charentes, argile hyperalumineuse, géostatistique, krigeage, simulation,

Abstract

The kaolinitic clays have been exploited for more than a hundred years, in the western part of the Charentes basin, and belong to the paleo-deltaic network. The genesis of the kaolin deposit of the Charentes basin obeys the simple geological rules, but their detailed geometry has a great complexity, reinforced by the fact that one must distinguish from clays, very different qualities.

The recent deposits are relatively richer in alumina in comparison with the older ones. These deposits which are deeper than the old ones have undergone often more intense post-sedimentary phenomena. In this study, the chemical composition of the various deposits of this basin is studied. The formation of hyperaluminous clays is particularly studied.

The available data are the results of chemical analysis of the kaolinitic core samples. This data are used to improve our knowledge on the kaolins compositions of different classes and different deposits by using the statistical analyses.

Geostatistical methods are proposed for the study of the Charentes deposits and are applied to some of them. The problems of the application of the geostatistical tools for this kind of deposit are described, and the more adapted methods are proposed.

We insist on the importance of the spatial variability of the chemical composition on the management of exploration, extraction/classification and production. We show how the use of these tools can help us to better manage the production, from the kaolin deposits.

The geostatistical simulations help us to visualize the spatial variability of the various categories of kaolins. They were implemented within the framework of the trucked gaussian methods (pluri-gaussians). Two cases were treated: simulation of argillaceous facies (distinguished mainly by the visual criteria), and simulation of kaolin classes defined by their content of Al_2O_3 .

Keywords: Kaolin, Charentes, Gibbsite clay, Geostatistics, Kriging, Simulation

Sommaire

Table des Matières

<u>CARACTERISATION, ESTIMATION ET VALORISATION DE GISEMENTS D'ARGILES KAOLINIQUES DU BASSIN DES CHARENTES</u>	<u>I</u>
REMERCIEMENTS	II
RESUME	IV
ABSTRACT	V
SOMMAIRE	VI
TABLE DES MATIERES	VI
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES TABLEAUX	XVI
<u>I. INTRODUCTION GENERALE</u>	<u>1</u>
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. POSITION DU SUJET	3
I.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE	5
I.4. OBJETS DE L'ETUDE	6
I.5. DEMARCHE SUIVIE	9
I.6. PLAN DE LA THESE	10
<u>II. LES ARGILES KAOLINIQUES ET LEURS USAGES</u>	<u>11</u>
II.1. ARGILES	13
II.2. KAOLIN	15
II.2.1. QUELQUES EXEMPLES DE GISEMENTS DE KAOLIN DANS LE MONDE	15
II.2.2. LES GISEMENTS DE KAOLIN EN FRANCE	15
II.3. PROPRIETES DES KAOLINS INDUSTRIELS	17
II.3.1. COULEUR	17
II.3.2. FORME ET TAILLE	17
II.3.3. CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE	18
II.3.4. CRISTALLINITE	18
II.3.5. PROPRIETES THERMIQUES	19
II.3.6. DURETE	20
II.4. LES PRINCIPAUX USAGES INDUSTRIELS DU KAOLIN	20
II.4.1. PAPIER	20
II.4.2. CERAMIQUES	22
II.4.3. REFRACTAIRES	23
II.4.4. MATERIAUX DE CONSTRUCTION	24
II.4.5. LES APPLICATIONS MEDICALES ET COSMETIQUES	25
II.4.6. CHARGES	25
II.4.7. AUTRES APPLICATIONS	27
II.5. PRODUCTION DU KAOLIN ET LES ENJEUX MINIERES ET INDUSTRIELS	28

II.5.1. INTRODUCTION	28
II.5.2. PROSPECTION ET EXPLORATION DU KAOLIN	28
II.5.3. EXPLOITATION OU EXTRACTION DU KAOLIN	32
II.5.4. TRAITEMENT DU KAOLIN ET LA PREPARATION INDUSTRIELLE	35
II.5.5. HOMOGENEISATION DE L'ALIMENTATION ET DU PRODUIT	41
II.6. ECONOMIE DU KAOLIN	43
II.6.1. PRODUCTION DU KAOLIN AU BRESIL	46
II.6.2. PRODUCTION DE KAOLIN EN CHINE	46
II.6.3. PRODUCTION DE KAOLIN EN CHARENTES	46
II.7. CONCLUSION	47
 III. GEOLOGIE DU KAOLIN ; CAS DU BASSIN DES CHARENTES	 49
 III.1. GEOLOGIE ET LA FORMATION DU KAOLIN	 51
III.1.1. INTRODUCTION	51
III.1.2. VOYAGE DES ELEMENTS DE LA ROCHE MERE AU KAOLIN	51
III.1.3. MINERALOGIE DES KAOLINS	55
III.1.4. ORIGINE ET LA FORMATION DES KAOLINS COMMERCIAUX DE GEORGIE ET DE CAROLINE DU SUD	56
III.2. STRATIGRAPHIE ET LITHOLOGIE DES SEDIMENTS DU BASSIN DES CHARENTES	58
III.2.1. FORMATION DES SEDIMENTS	58
III.2.2. HISTOIRE GEOLOGIQUE DU BASSIN AQUITAIN	59
III.2.3. LA STRATIGRAPHIE LOCALE, OUTIL DE LA PROSPECTION	64
III.2.4. EPAISSEUR DES DEPOTS	65
III.2.5. LES ARGILES HYPERALUMINEUSES	68
III.3. GEOMETRIE DES DEPOTS DE KAOLIN	69
III.4. CLASSIFICATION DES GISEMENTS DE KAOLIN DU BASSIN DES CHARENTES	69
III.5. CONCLUSION	72
 IV. ANALYSES STATISTIQUES DES DONNEES DE SONDAGES DU BASSIN DES CHARENTES	 73
 IV.1. SONDAGES ET ACQUISITION DES DONNEES	 75
IV.1.1. PROSPECTION ET MAILLE DE SONDAGE	75
IV.1.2. CAROTTAGE	75
IV.1.3. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DU SONDAGE ET CODAGE DES ECHANTILLONS	77
IV.1.4. PREPARATION ET ANALYSE DES ECHANTILLONS	83
IV.1.5. PROBLEMES D'ECHANTILLONNAGE	84
IV.2. VARIABILITE A L'ECHELLE DU GISEMENT ET DU BASSIN SEDIMENTAIRE	89
IV.2.1. VARIATION DE LA QUALITE ; OBSERVATIONS SUR LE TERRAIN	89
IV.3. ANALYSE CRITIQUE DES DONNEES	92
IV.3.1. ASSOCIATIONS MINERALES	92
IV.3.2. REPARTITION ET SUCCESSION DES FACIES	93
IV.3.3. MINERALOGIE ET ASSOCIATIONS GEOCHIMIQUES	98
IV.3.4. ANALYSE STATISTIQUE A PLUSIEURS VARIABLES	110
IV.3.5. CLASSIFICATION PAR L'ANALYSE DISCRIMINANTE	116
IV.3.6. CONTINUITE SPATIALE	117
IV.4. CONCLUSION	119

<u>V. ESTIMATION DE LA QUALITE DES KAOLINS DES GISEMENTS DU BASSIN DES CHARENTES</u>	121
V.1. INTRODUCTION	123
V.2. PROBLEME D'ESTIMATION	123
V.2.1. VARIABLE ADDITIVE	123
V.2.2. DES TAILLES DES ECHANTILLONS ET DE LA REGULARISATION DU SUPPORT D'ESTIMATION	132
V.2.3. DONNEES MANQUANTES	138
V.2.4. GEOMETRIE DU GISEMENT	140
V.2.5. DEFINITION DE LA LIMITE DU GISEMENT OU CADRE DE L'ESTIMATION	148
V.2.6. CIBLE D'ESTIMATION	149
V.3. APPLICATIONS DES OUTILS DE LA GEOSTATISTIQUE	150
V.3.1. VARIOGRAPHIE DES DIFFERENTS GISEMENTS	150
V.3.2. MAILLE DE SONDAGE OPTIMALE	152
V.3.3. COMPARAISON DU KRIGEAGE AVEC LA METHODE DU PLUS PROCHE VOISIN (PPV)	160
V.4. GISEMENT BOIS DES RENTES (BDR)	166
V.4.1. PRESENTATION DU GISEMENT	166
V.4.2. ESTIMATION DE LA PUISSANCE ET DES ACCUMULATIONS	173
V.4.3. ESTIMATION PAR BANCS DE 2M D'EPAISSEUR	188
V.5. CONCLUSION	196
 <u>VI. SIMULATION DES QUALITES D'ARGILE ET DES LITHOFACIES</u>	 199
VI.1. INTRODUCTION	201
VI.2. COMPARAISON DES METHODES D'ESTIMATION A L'AIDE DE LA SIMULATION GEOSTATISTIQUE	201
VI.2.1. MISE EN OEUVRE DE LA COMPARAISON DES METHODES D'ESTIMATION	202
VI.2.2. ETUDE SUR LE GISEMENT SAINT-GEORGES	203
VI.2.3. ETUDE SUR LE GISEMENT BDR-NE	209
VI.3. SIMULATION DES VARIABLES CATEGORIELLES	218
VI.3.1. INTRODUCTION A LA SIMULATION DES VARIABLES CATEGORIELLES	218
VI.3.2. MODELE DES GAUSSIENNES SEUILLEES	219
VI.3.3. MISE EN ŒUVRE DE LA SIMULATION GAUSSIENNE	220
VI.4. SIMULATION DES LITHOFACIES DU GISEMENT BDR	222
VI.4.1. DELIMITATION VERTICALE DES COUCHES KAOLINIQUES DU GISEMENT.	222
VI.4.2. ANALYSE STATISTIQUE DES FACIES	223
VI.4.3. ANALYSE STATISTIQUE DES LITHOTYPES DU GISEMENT	225
VI.4.4. CALCUL DU VARIOGRAMME DES GAUSSIENNES ET AJUSTEMENT DU MODELE	227
VI.4.5. CALCUL DES VARIOGRAMME DU GISEMENT	227
VI.4.6. SIMULATIONS DES LITHOFACIES LITHOLOGIQUES DU GISEMENT	229
VI.5. CONCLUSION	230
VI.6. SIMULATION DE LA DEUXIEME SEQUENCE KAOLINIQUE DU BDR	231
VI.6.1. DELIMITATION VERTICALE D'UNE SEQUENCE KAOLINIQUE	231
VI.6.2. ANALYSE STATISTIQUE DES LITHOTYPES DE LA SEQUENCE KAOLINIQUE	232
VI.6.3. CALCUL DES VARIOGRAMME DE LA SEQUENCE KAOLINIQUE	234
VI.6.4. SIMULATIONS DES LITHOFACIES LITHOLOGIQUE DE LA SEQUENCE KAOLINIQUE	236
VI.6.5. STATISTIQUES SUR PLUSIEURS SIMULATIONS	238
VI.7. CONCLUSION	238
VI.8. SIMULATION DE LA QUALITE D'ARGILE EN TANT QU'UNE VARIABLE CATEGORIELLE	240
VI.8.1. ANALYSE DES CONTACTS DES FOURCHETTES D' Al_2O_3	240

Sommaire

VI.8.2. LA COURBE DE PROPORTION VERTICALE (CPV) DES GROUPES	241
VI.8.3. CALCUL DU VARIOGRAMME DES GAUSSIENNES ET AJUSTEMENT DU MODELE	243
VI.8.4. SIMULATIONS DES GROUPES	246
VI.9. CONCLUSION	249
VII. CONCLUSION ET PERPECTIVES	251
VII.1. CONCLUSION	253
VII.2. PERSPECTIVES	254
A. INTRODUCTION A LA GEOSTATISTIQUE	257
A.1. INTRODUCTION GENERALE	259
A.2. HISTOIRE DE LA GEOSTATISTIQUE	259
A.3. LANGAGE DE LA GEOSTATISTIQUE	260
A.3.1. SUPPORT DES OBSERVATIONS	261
A.3.2. DEUX PROBLEMES COMPLEXES	261
A.4. VARIOGRAMME EXPERIMENTAL	263
A.4.1. CALCUL DU VARIOGRAMME EXPERIMENTAL	263
A.4.2. INTERPRETATION DU VARIOGRAMME	267
A.4.3. PROBLEMES COURANTS AVEC LES VARIOGRAMMES	268
A.5. MODELISATION DU VARIOGRAMME	269
A.5.1. PARAMETRES DU VARIOGRAMME	269
A.5.2. POURQUOI UN MODELE	269
A.5.3. MODELES DU VARIOGRAMME	269
A.5.4. ANISOTROPIES	272
A.6. VARIANCE DE BLOC	272
A.7. VARIANCE D'EXTENSION, D'ESTIMATION, DE DISPERSION	274
A.7.1. VARIANCE D'ESTIMATION	274
A.7.2. VARIANCE D'EXTENSION :	275
A.7.3. VARIANCE DE DISPERSION	275
A.8. KRIGEAGE	276
A.8.1. METHODES DU KRIGEAGE LINEAIRE	276
A.8.2. PROPRIETES DU KRIGEAGE	278
B. GLOSSAIRE	279
B.1. STATISTIQUE	281
B.2. KAOLIN	287
REFERENCES	299
A-D	301
E-H	305
I-L	307
M-P	309
Q-T	312
U-Z	314

Liste des figures

figure II.1 Structure cristallographique de minéraux argileux	14
figure II.2 Plan de situation des gisements d'argiles en France	16
figure II.3 Schéma des particules de kaolin, les lignes pointillées représentent l'eau absorbée	17
figure II.4 Méthode de détermination des indices de la cristallinité de la kaolinite	18
figure II.5 Schéma des transformations des trois composants principaux des argiles kaoliniques	19
figure II.6 Limites des courbes de granulométrie pour les deux utilisations du kaolin dans le papier (Manning 1995)	22
figure II.7 Opération de découverte du sable dans la carrière de Bois des Rentes (BDR), le taux de recouvrement est 5.5 m ³ /t d'argile	33
figure II.8 Exploitation du kaolin par une pelle mécanique	34
figure II.9 Schéma du procédé de production du kaolin en Cornouaille (Wilson 2006).	36
figure II.10 Schéma de procédé de production du kaolin, (a) kaolin de Géorgie et (b) China Clay de Cornwall (Gillott 1987)	37
figure II.11 Organigramme des étapes typiques du traitement du kaolin par voie humide (Pickering 2002).	38
figure II.12 Schéma de la production et les industries destinataires pour chaque produit	40
figure II.13 Deux trémies asservies (b) pour alimenter le déchiqueteur (a) : le taux de passage est contrôlé par la vitesse relative de rotation d'une bande par rapport à l'autre.	41
figure II.14 Système d'homogénéisation d'alimentation de processus de la calcination de l'usine orillons	42
figure III.1 Effet des facteurs contrôlant la formation des produits d'altération (Allen, 1997).	51
figure III.2. Schéma idéalisé indiquant les changements progressifs d'un rouleau de sérécite en piles de kaolinite	53
figure III.3 Distribution des minéraux dans les apports des différentes rivières (d'après Weaver, 1989).	54
figure III.4 Schéma montrant les différents stades de la formation des lentilles d'argiles kaoliniques des Charentes (d'après Dubreuilh).	59
figure III.5 Régions et pays d'Aquitaine Occidentale (a) et la carte géologique schématique (d'après Vigneaux, 1975).	63
figure III.6 Coupes litho stratigraphiques synthétiques du Tertiaires sud-occidental	64
figure III.7 Coupes litho stratigraphiques synthétiques du Tertiaires nord-oriental.	65
figure III.8 Effet de la compaction différentielle	66
figure III.9 . Situation géographique et principales limites géologiques des formations tertiaires des Charentes (d'après Dubreuilh et Platel, 1982)	67
figure III.10 Localisation des familles A et B par rapport aux limites d'affleurement du substratum calcaire crétacé (d'après Yvon et al.) et les schémas des succions lithologiques et minéralogiques (Dubreuilh et al. 1984)	70
figure IV.1 Equipe de sondage ; le camion du système sondeuse et le camion de support	76
figure IV.2 Un paramètre important dans l'estimation, est la situation spatiale de l'échantillon. Sur cette photo, on observe une carotte quasiment complète (1.5 m) qui est récupérée à la suite du passage d'une séquence sableuse (pas d'échantillon carotté).	76
figure IV.3 Mise en caisse des carottes des sondages de prospection, pour étude géologique.	77
figure IV.4 Différentes colorations du kaolin par les oxydes de fer	78
figure IV.5 Nodule centimétrique de pyrite dans la carrière de Grand Pas, sur la cassure conchoïdale d'une argile pierreuse (a), Traces des nodules de pyrite écrasée par la pelle, carrière Chez-Maudet (b)	79
figure IV.6 Quelques exemples d'éléments figurés	80
figure IV.7 Rognure continue et assez grande d'une argile grasse (a), la cassure conchoïdale et l'apparence compacte d'une argile pierreuse (b).	81
figure IV.8 Diagramme donnant le processus d'obtention des données	83
figure IV.9 Diagramme donnant le processus d'analyse des carottes	84

figure IV.10 Log de sondage S5.05910, les rectangles rouges montrent la taille des échantillons qui pourraient être pris par la méthode pratiquée chez AGS.	87
figure IV.11 Comparaison de la teneur sur 4 éléments (perte au feu, alumine, potasse et fer) pour les échantillons analysé chaque demi-mètre (cercle) et les segments homogène (tiret)	88
figure IV.12 Une section présentant les différentes séquences des couches argileuses et leurs catégories basées sur la teneur en Al_2O_3 (interprétation géologique).	89
figure IV.13 Les points noirs entre les deux textures différentes d'argile sont en fait de la pyrite écrasée par le godet de la pelle mécanique.	90
figure IV.14 Exemple du comblement de fissures d'argile sableuse par du sable fin (a) et de traces de petites inter - couches sableuses se distinguant par les couleurs des oxydes de fer (b).	91
figure IV.15 Différents faciès dans la carrière de Planton.	92
figure IV.16 Nuage de dispersion de K_2O - TiO_2 sur tous les échantillons analysés	93
figure IV.17 Portion de chaque lithologie de kaolin dans les groupes de sondages	94
figure IV.18 Présence des argiles pierreuses sur les argiles ligniteuses	95
figure IV.19 Proportion d'argile pierreuse dans les groupes, et localisation des groupes étudiés	96
figure IV.20 Histogramme de la teneur en Al_2O_3 des argiles kaoliniques des Charentes (Groupe : St.Georg5, Bois Charles, Chez Arlot, Planton)	100
figure IV.21 Histogramme de la teneur en Al_2O_3 des argiles kaoliniques des Charentes (Groupe : Maudet, Grand Pas1, Grand Pas2, Bois des rentes)	101
figure IV.22 Histogramme de la teneur en K_2O des argiles kaoliniques des Charentes (Groupe : Maudet, Grand Pas1, Grand Pas2, Bois des rentes)	103
figure IV.23 Nuage de dispersion de K_2O - Fe_2O_3 (PLANTON, BCHAR3, CHIERZAC, STGEORG5)	105
figure IV.24 Nuage de dispersion de K_2O - Fe_2O_3 (ARLOT, MAUDET, GDPA2, BRENTES2)	106
figure IV.25 Nuage de dispersion de K_2O - MgO (ARLOT, BCHAR3, MAUDET, BRENTES)	108
figure IV.26 Nuage de dispersion de K_2O - Al_2O_3 (BCHAR3, STGEORG5, MAUDET, BRENTES2)	109
figure IV.27 Résultats de la classification ascendante hiérarchique	113
figure IV.28 Portion de chaque facteur dans la variance totale, calculée par l'analyse factorielle des données.	113
figure IV.29 Analyse factorielle des données pour 9 groupes de sondages	114
figure IV.30 Nuages de la valeur des deux premiers composants principaux pour les échantillons	115
figure IV.31 Classement des codes par la classification multivariable	116
figure IV.32. Tonnage des gisements exploités de 1970 à 1995.	118
figure IV.33 Distribution de la puissance apparente de chaque lithologie dans les sondages du gisement Bois des Rentes	119
figure V.1 Relation entre la teneur en Al_2O_3 -brute et Al_2O_3 -calcinée pour les données de la zone sondée 10*10m du gisement BDR	125
figure V.2 Relation entre la PF et la teneur en Al_2O_3 calcinée pour les données de la zone sondée 10*10m du gisement BDR	125
figure V.3 Nuages de corrélation entre l'épaisseur du kaolin et l'accumulation de la perte au feu et l'accumulation d' Al_2O_3 calcinée et Al_2O_3 brute	127
figure V.4 Variogrammes expérimentaux de l'épaisseur du kaolin, de l'accumulation de la perte au feu, de l'accumulation d' Al_2O_3 calcinée et Al_2O_3 brute	129
figure V.5 Nuages de corrélation entre l'accumulation d' Al_2O_3 calcinée et d' Al_2O_3 brute(a) et comparaison de la moyenne d' Al_2O_3 calculée par les deux méthodes (b).	130
figure V.6 Histogramme de la teneur en Al_2O_3 calcinée (Al_2O_3 -C) et en Al_2O_3 brute (Al_2O_3 -B) et histogramme de la perte au feu dans la zone de BDR échantillonnée selon une maille (10*10)	130
figure V.7 Dispersion de la teneur estimée en Al_2O_3 calcinée et en Al_2O_3 brute (b), résultat de la teneur estimée en Al_2O_3 cuite en utilisant les données d'alumine brute et la perte au feu sur la teneur estimée en alumine brute (a) et comparaison entre les résultat des deux processus d'estimation (c).	131
figure V.8 Histogramme de la perte au feu estimée et diagramme de dispersion des valeurs estimés d' Al_2O_3 par krigeage direct de la teneur mesurée et d' Al_2O_3 brute normalisée.	132

figure V.9 Histogramme de la taille des échantillons, par classe lithologique (a), et pour toutes les argiles kaoliniques (b).	134
figure V.10 Comparaison entre l'histogramme de la teneur des échantillons pondérée par leur longueur et sans considération de la longueur des échantillons (a), les histogrammes d' Al_2O_3 brute pour les échantillons régularisés sur les supports d'une longueur d'un demi-mètre, 1.0m, 1.5m et 2.0m. Seulement les échantillons complets sont pris en compte	135
figure V.11 Effet de la régularisation sur les variogrammes	136
figure V.12 Variogrammes verticaux de la teneur en Al_2O_3 -B pour les supports de longueur 0.5m, 1.0m, 1.5m et 2.0m (a), Comparaison entre le variogramme ponctuel et celui de support de 0.5m (b).	137
figure V.13 Comparaison du variogramme d' Al_2O_3 mesuré et moyenné (Al_2O_3 -m).	138
figure V.14 Implantations des sondages dans le gisement Chez-Arlot	139
figure V.15 Horizontalisation par rapport à une surface de guidage (ici mur de la couche inférieure) (a), Horizontalisation par rapport à deux surfaces de guidage (b)	141
figure V.16 Coupe du gisement BDR-NE parallèle à l'axe X et d'ordonnée constante $Y=336200$	141
figure V.17 Nombre des paires de calcul pour le variogramme cartésien et le variogramme horizontalisé (a), Comparaison des deux variogrammes mentionnés pour les variables	142
figure V.18 Un exemple de la discrétisation des échantillons entre deux surfaces du guidage du gisement de BDR.	144
figure V.19 Mise en relation des données par les deux surfaces limitantes du gisement, marquée par les lignes noire et la ligne verte (a) et une relation géologique ; la ligne rouge et bleue montre la limite entre les deux séquences kaoliniques K1 et K2 (b).	144
figure V.20 Histogramme de l'épaisseur du kaolin prise entre les deux surfaces limitantes du gisement sur les sondages (a), Plan de répartition de l'épaisseur (b).	145
figure V.21 Variogramme d'alumine calcinée (a) et d'alumine brute (b) dans la nouvelle géométrie décompactée et mise à l'horizontale en utilisant deux surfaces qui englobent le gisement de BDR	145
figure V.22 Variogramme de la PF (a), de l'alumine calcinée (b) et de l'oxyde de fer (c) et de la potasse (d) dans le gisement de BDR-NE	146
figure V.23 Variogramme de l'indicatrice du kaolin (a) et graphe du nombres des données (b)	147
figure V.24 Délimitation d'un gisement par des sondages	149
figure V.25 Plan d'implantation des sondages dans les gisements de Chez-Arlot, de Chierzac, St. George, Bois Charles et Chez-Maudet.	151
figure V.26 Variogrammes expérimentaux calculés dans les tranches horizontales	152
figure V.27 Positionnement des sondages sur une cellule de $80*80$ (a) et distance des sondages au centre(b)	153
figure V.28 La maille de sondage et les données disponibles (les points en bleu) pour l'estimation d'un bloc de même taille que la maille de sondage (carré ou losange en hachure).	154
figure V.29 Précision d'estimation de la teneur en alumine brute (a) et de la perte au feu (b) des blocs d'une taille de $80*80\text{m}$ et de $40*40\text{m}$.	159
figure V.30 Comparaison entre la moyenne de la variance d'extension et la variance de l'erreur de krigeage avec la géométrie estimants-estimés présentée dans la figure V.29.	160
figure V.31 Utilisation de la moyenne pondérée pour calculer la valeur d'un bloc de $20*20$ (méthode PPV)	161
figure V.32 Exemple du calcul de la moyenne d'un bloc $20*20$,	161
figure V.33 Plan d'implantation des sondages dans la zone sud-ouest	162
figure V.34 Variogrammes expérimentaux (horizontaux) d' Al_2O_3	163
figure V.35 Modèles du variogramme horizontal d' Al_2O_3 : a) modèle isotrope b) modèle anisotrope	163
figure V.36 Variogrammes expérimentaux (verticaux) de la teneur en Al_2O_3	164
figure V.37 Géométrie de l'espace de l'estimation (a), et tableaux des poids du krigeage pour le modèle isotrope (b) et le modèle anisotrope (c)	165
figure V.38 Comparaison entre l'estimation polygonale et le krigeage sur les blocs de $20*20\text{m}$	165
figure V.39 Positionnement de gisement BDR, et celle de GDP et Godillon	166
figure V.40 Implantation des sondages dans le gisement BDR	167

figure V.41	Histogrammes de la fréquence des codes d'argile calculés en pondérant par l'épaisseur des échantillons	168
figure V.42	Histogrammes d' Al_2O_3 et de PF calculés en pondérant par l'épaisseur des échantillons.	169
figure V.43	Ajustement par trois distributions gaussiennes de l'histogramme d' Al_2O_3	170
figure V.44	Histogrammes de Fe_2O_3 et de TiO_2 calculés en pondérant par l'épaisseur des échantillons	171
figure V.45	Histogrammes de K_2O calculés en pondérant par l'épaisseur des échantillons.	171
figure V.46	Relation non linéaire entre la teneur en Al_2O_3 et Al_2O_3 -calciné pour différentes compositions chimiques et les données du gisement BDR.	172
figure V.47	Relation non linéaire entre la PF et la teneur en Al_2O_3 calcinée pour différentes compositions chimiques et les données du gisement BDR.	172
figure V.48	Schématisation du calcul de la puissance d'argile et de l'accumulation des éléments chimiques (Al_2O_3 ici).	174
figure V.49	Implantation des sondages, et épaisseur accumulée des couches	175
figure V.50	Plan représentant la moyenne de la teneur en Al_2O_3 calculée le long de chaque sondage, calculée en divisant l'accumulation en Al_2O_3 de chaque sondage par sa puissance.	176
figure V.51	Histogrammes de l'épaisseur cumulée d'argile (la puissance) et des accumulations des éléments principaux	177
figure V.52	Variogrammes expérimentaux simples et croisés en utilisant les valeurs nulles	180
figure V.53	Variogrammes de la puissance d'argile (a) et de l'accumulation d' Al_2O_3 (b), obtenus sur deux directions perpendiculaires de 0, 90 et 45, 135 degrés.	181
figure V.54	Variogramme omnidirectionnel de la puissance d'argile et de l'accumulation d' Al_2O_3 respectivement et les modèles ajustés à ces variogrammes.	181
figure V.55	Résultat de la validation croisée du modèle d'estimation de la puissance d'argile sur les sondages	182
figure V.56	Variogrammes de la puissance d'argile (a) et de l'accumulation d' Al_2O_3 (b), faites selon les directions 0, 90 et 45, 135 degrés. Partie NE du gisement.	183
figure V.57	Variogramme omnidirectionnel de la puissance d'argile et de l'accumulation d' Al_2O_3 respectivement et les modèles ajustés à ces variogrammes	183
figure V.58	Résultat de la validation croisée du modèle d'estimation de la puissance d'argile sur les sondages du sous domaine BDR-NE	184
figure V.59	Variogrammes de la puissance d'argile (a) et de l'accumulation d' Al_2O_3 (b), selon les directions 0, 90 et 45, 135 degrés, Partie SW du gisement	185
figure V.60	Variogramme omnidirectionnel de la puissance d'argile et de l'accumulation d' Al_2O_3 respectivement et les modèles ajustés à ces variogrammes.	185
figure V.61	Résultat de la validation croisée du modèle d'estimation de la puissance d'argile sur les sondages du sous-domaine BDR-SW	186
figure V.62	Puissance estimée d'argile par krigeage (a) et écart- type de l'estimation (b).	187
figure V.63	Représentation graphique du calcul de la régularisation par banc de 2 m. d'épaisseur.	189
figure V.64	Variation des variables par bancs de 2m, les variables sont respectivement les suivantes : Somme des puissances partielles, les moyennes de PF, Al_2O_3 , TiO_2 et Fe_2O_3	190
figure V.65	Variogrammes horizontaux de l'épaisseur d'argile dans chaque tranche (a) et son accumulation d' Al_2O_3 (b) ; la forme du variogramme de l'accumulation suit celle du variogramme de l'épaisseur.	192
figure V.66	Variogramme de l'épaisseur d'argile et son modèle ajusté (a) horizontal et (b) vertical	192
figure V.67	Variogramme de l'accumulation partielle d' Al_2O_3 et son modèle ajusté (a) horizontal et (b) vertical	193
figure V.68	Validation croisée de l'accumulation et de la puissance partielle	194
figure V.69	Moyenne de l'épaisseur d'argile kaolinique existant dans chaque bloc (a) et moyenne de la teneur en Al_2O_3 (b), dans le gisement BDR-NE ; Z=50m	195
figure VI.1	Implantation des sondages et le positionnement des blocs d'estimation (St. Georges)	203
figure VI.2	Histogramme d'alumine (a) et la variable transformé en distribution gaussien (b) et l'ajustement de polynôme de la transformation gaussienne (St. Georges)	204

figure VI.3 Variogramme de la teneur en alumine (a. horizontal b. vertical) et variogramme de la variable gaussienne (c. horizontal d. vertical)	204
figure VI.4 Nuage des points comparant des valeurs estimées (a), l'erreur d'estimation du variable gaussienne sur les sous-blocs	205
figure VI.5 Classification de la réserve du gisement BDR-NE	206
figure VI.6 Nuage des points estimés et réels, (présentés par la densité des points) ;	207
figure VI.7 Trois réalisations de la simulation de la teneur en alumine	208
figure VI.8 Histogramme de la fréquence verticale des échantillons kaoliniques (a), et le plan d'implantation des sondages et la maille d'estimation (b).	209
figure VI.9 Histogramme d'Alumine (a) et la variable transformée en distribution gaussienne (b) et l'ajustement de polynôme de Hermite (BDR-NE)	210
figure VI.10 Alumine estimée par krigeage et le plus proche voisin pour des blocs d'une taille 20*20*0.5m à z=30m, dans le gisement BDR-NE	211
figure VI.11 Variogrammes expérimentaux et les modèles ajustés pour la variable gaussienne	211
figure VI.12 Trois réalisations de la simulation de la teneur en alumine dans le gisement BDR-NE, Z=30	212
figure VI.13 Histogramme de l'écart-type de l'erreur du krigeage sur les sous blocs du gisement BDR-NE	212
figure VI.14 Nuage des points estimé-réel présenté par densité des points	213
figure VI.15 Classification de la réserve du gisement BDR-NE	214
figure VI.16 Processus de la simulation des faciès (1, 2 et 3) par une variable gaussienne	219
figure VI.17 Processus du remplacement d'une valeur catégorielle par une valeur tirée d'une distribution gaussienne, la valeur gaussienne simulée peut être traduite de même façon en une variable catégorielle comme un lithofaciès.	220
figure VI.18 Deux exemples d'horizontalisation par rapport à une référence	221
figure VI.19 Présentation	222
figure VI.20 Proportions globales calculées le long de la verticale (CPV) du gisement	226
figure VI.21 Répartition des proportions des 3 lithotypes dans une grille régulière de 7 *7.	226
figure VI.22 Vue globale des courbes verticales de proportion des lithotypes dans chaque cellule de la grille de proportion	227
figure VI.23 Arrangement des lithofaciès pour une simulation par la méthode gaussienne seuillée (une seule gaussienne)	227
figure VI.24 Arrangement possible des lithotypes pour une simulation par la méthode plurigaussienne.	228
figure VI.25 Variogrammes horizontaux (simples et croisés) et ajustement du modèle sur les indicatrices des lithotypes (du gisement)	228
figure VI.26 variogrammes verticaux et ajustement du modèle sur les indicatrices des lithotypes (du gisement)	229
figure VI.27 Comparaison entre simulations conditionnelles sur le profil de X=401600 pour les 6ème et 7ème réalisations	229
figure VI.28 Présentation graphique de l'indice de la présence d'argile sur la tranche de 50m, et de 60m du gisement.	230
figure VI.29 Variogrammes des surfaces de toit et de mur et leur modèle	231
figure VI.30 Présentation graphique du toit et du mur de la séquence kaolinique en 3D. (Facteur d'exagération verticale : 5)	232
figure VI.31 Proportions globales calculées le long de la verticale (CPV) de la séquence kaolinique	233
figure VI.32 Répartition des proportions des 3 lithotypes dans une grille régulière de 12 *12 (la séquence kaolinique).	233
figure VI.33 Vue globale des courbes verticales de proportion des lithofaciès dans chaque cellule de la grille de proportion (la séquence kaolinique).	234
figure VI.34 Variogrammes horizontaux (simples et croisés) dans la direction N0, et ajustement du modèle sur les indicatrices des lithotypes de la séquence kaolinique	235
figure VI.35 Variogrammes horizontaux (simples et croisés) dans la direction N90, et ajustement du modèle sur les indicatrices des lithotypes de la séquence kaolinique	235

figure VI.36 Variogrammes verticaux et ajustement du modèle sur les indicatrices des lithotypes de la séquence kaolinique	236
figure VI.37 Comparaison entre simulations conditionnelles sur le profil de Y=336000 pour les première, 10ème et 20ème réalisations de la séquence kaolinique	236
figure VI.38 Présentation graphique de la chance de présence d'argile sur la tranche de 50m et 60m, de la séquence kaolinique.	237
figure VI.39 Proportions globales calculées des groupes, le long de la verticale (CPV)	242
figure VI.40 Répartition des proportions des 3 groupes dans une grille régulière de 12 *12	242
figure VI.41 Vue globale des courbes verticales de proportion des groupes dans chaque cellule de la grille de proportion	243
figure VI.42 Arrangement choisi pour une simulation par la méthode plurigaussienne	243
figure VI.43 Variogrammes expérimentaux des indicatrices des groupes	244
figure VI.44 Variogrammes horizontaux simples ajustement du modèle sur les variogramme des indicatrices des groupes	245
figure VI.45 Variogrammes horizontaux croisées ajustement du modèle sur les variogramme des indicatrices des groupe	245
figure VI.46 Variogrammes verticaux et ajustement du modèle sur les indicatrices des groupes du gisement	246
figure VI.47 Comparaison entre simulations conditionnelles sur le profil de Y=336000 pour 15ème et 30ème réalisation	246
figure VI.48 Comparaison entre simulations conditionnelles des groupes, tranche horizontales de 50m de l'altitude	247
figure VI.49 Présentation graphique de l'indice de la présence d'argile hyper-alumineuse (Arg. +44%) sur la tranche horizontale de 49.4 et 59.5m d'altitude	248
figure A.1 Nuage de corrélation, teneur estimée et teneur vraie. Les quatre zones de la justesse de la décision minéral/stérile à partir d'un seuil de teneur.	262
figure A.2 Variogramme expérimental d'alumine brut dans le gisement Chez-Maudet, calculé au long de sondage (a), par les tranches horizontales (b). La ligne pointille montre la variance des données utilisées dans le calcul. Le nombre des paires est mentionné pour chaque pas du variogramme.	264
figure A.3 Exemple de calcul d'un variogramme expérimental, maille des sondages (a), section des sondages et du gisement (b), les données à une distance d'un pas horizontal(c), le calcul du variogramme (d) (Clark 1979)	265
figure A.4 Calcul de la fonction d'auto-corrélation	265
figure A.5 Présentation des paramètres du calcul de variogramme expérimental.	266
figure A.6 Présentation graphique du variogramme expérimental et théorique	269
figure A.7 Allure des variogrammes du modèle sphérique	270
figure A.8 Allure des variogrammes du modèle exponentiel	270
figure A.9 Allure des variogrammes du modèle gaussien	270
figure A.10 Allure des variogrammes du modèle puissance	271
figure A.11 Ajuster un modèle au variogramme expérimental	271
figure A.12 Allures des modèles de la covariance sphérique et exponentielle	272
figure A.13 Modèles de la covariance avec les allures plus continues	272

Liste des tableaux

Tableau II.1 Classification sommaire des minéraux argileux	14
Tableau II.2 Nomenclature des argiles réfractaires et densité apparente (d'après Agnello, 2005)	15
Tableau II.3 Capacité d'échange de cation du kaolin, de ball clay et de la montmorillonite	18
Tableau II.4 Utilisations industrielles du kaolin (Bundy 1993 et Murray 1999)	20
Tableau II.5 Spécifications pour les produits standards de qualité "couchage" pour l'industrie de papier (Elzea Kogel J. 2002)	21
Tableau II.6 Spécification pour les kaolins de qualité "charge" pour l'industrie du papier	21
Tableau II.7 Distance entre les sondages pour chaque étape	30
Tableau II.8 Probabilité d'intercepter d'une cible circulaire par les sondages d'une maille régulière continue	31
Tableau II.9 Probabilité d'intercepter d'une cible circulaire par au moins d'un sondage d'une maille régulière continue	32
Tableau II.11 Production du kaolin 2001-2005 (Hetherington et al 2007).	44
Tableau III.1 Evènements géologiques plus importants de la sédimentologie du bassin *	62
Tableau III.2 Descriptions des formations tertiaires renfermant des dépôts argileux.	66
Tableau III.3 Typologie des argiles kaoliniques des Charentes (Delineau 1994)	71
Tableau IV.1 Taille des mailles de sondage selon la phase de prospection	75
Tableau IV.2. Codes des lithofaciès du bassin des Charentes et code de la couleur des argiles kaoliniques	78
Tableau IV.3 Description lithologique des codes des lithofaciès du Bassin des Charentes	81
Tableau IV.4 Comparaison des moyennes de la teneur des quelques composites sur les sondages à une faible distance	86
Tableau IV.5 Statistiques sur les contacts des faciès au long des sondages (GDPA1)	97
Tableau IV.6 Moyenne des teneurs en Al_2O_3 de chaque classe lithologique dans les groupes de sondages les plus importants	98
Tableau IV.7 Ecart type des teneurs en Al_2O_3 de chaque classe lithologique dans les groupes de sondages les plus importants	99
Tableau IV.8 Matrice de corrélation entre les variables de la composition chimique et minéralogique sur tous les échantillons ayant une analyse chimique complète.	112
Tableau IV.9 Matrice de corrélation entre les éléments en oxyde pour le gisement Bois Des Rentes (BDR)	112
Tableau V.1. Recette d'exploitation pour alimenter la production de chamotte 47N.	132
Tableau V.2. Statistique sur la taille et la longueur des différents supports	134
Tableau V.3 Statistique des variables sur différents supports	136
Tableau V.4 Effectif des échantillons non analysés par gisement	139
Tableau V.5 Maille de sondage aux différentes étapes d'exploration	153
Tableau V.6 Récapitulatif de la précision de l'estimation aux différentes étapes pour le gisement BDR-NE	155
Tableau V.7 Récapitulatif de la précision de l'estimation aux différentes étapes pour le gisement Chierzac	157
Tableau V.8 Récapitulatif de la précision de l'estimation aux différentes étapes pour le gisement Saint-Georges.	158
Tableau V.9 Paramètres statistiques des éléments chimiques les plus importants	169
Tableau V.10 Matrice de corrélation de la puissance d'argile et des accumulations des éléments principaux.	177
Tableau V.11 Paramètres statistiques de la puissance d'argile et d'accumulations des éléments principaux du gisement BDR	178
Tableau V.12 Comparaison des Paramètres statistiques de la moyenne d' Al_2O_3 et de PF calculés pour les sondages.	178
Tableau V.13 Comparaison des Paramètres statistiques de la moyenne de Fe_2O_3 et de TiO_2 calculés pour les sondages.	178

Tableau V.14 Paramètres statistiques de la puissance d'argile et d'accumulation des éléments principaux sous-domaine Nord-est	178
Tableau V.15 Paramètres statistiques de la puissance d'argile et d'accumulation des éléments principaux. sous-domaine Sud-ouest	179
Tableau V.16 Résultat de la validation croisée du modèle de la puissance	182
Tableau V.17 Résultat de la validation croisée du modèle de la puissance dans le sous domaine de BDR-NE	184
Tableau V.18 Résultat de la validation croisée de modèle de la puissance dans le sous domaine de BDR-SW	185
Tableau V.19 Valeurs par défaut assignées par code lithologique et critère de couleur pour le gisement BDR	189
Tableau V.20 Statistique sur l'épaisseur et les éléments chimiques des échantillons kaoliniques par tranche horizontale (cas des bancs de 2 m d'épaisseur)	191
Tableau V.21 Résultat de la validation croisée du modèle de l'épaisseur d'argile, dans le sous domaine de BDR-NE	193
Tableau V.22 Paramètres statistiques de la validation croisée du modèle de variogramme de l'accumulation d' Al_2O_3 , dans le sous domaine de BDR-NE	193
Tableau VI.1 Comparaison des effectifs des sous blocs classés par le krigeage et le PPV, (St. Georges)	205
Tableau VI.2 Moyenne de la teneur simulée des sous-blocs dans chaque classe (St Georges)	206
Tableau VI.3 Ecart-type de la teneur simulée des sous-blocs dans chaque classe (BDR-NE).	207
Tableau VI.4 Comparaison des effectifs des sous blocs classé par le krigeage et le PPV, (BDR-NE)	214
Tableau VI.5 Moyenne de la teneur simulée des sous-blocs dans chaque classe (BDR-NE).	215
Tableau VI.6 Ecart-type de la teneur simulée des sous-blocs dans chaque classe (BDR-NE)	217
Tableau VI.7 Longueur des échantillons, et des échantillons assemblés	223
Tableau VI.8 Effectif des contacts verticaux entre les lithologies (sens d'investigation : vers le bas)	224
Tableau VI.9 Regroupement des lithologies du gisement sous 3 lithotypes.	225
Tableau VI.10 Proportions des lithotypes du gisement	225
Tableau VI.11 Comparaison des proportions des lithotypes du gisement, sur les CPV	227
Tableau VI.12 Statistique sur les contacts des lithotypes du gisement	228
Tableau VI.13 Regroupement des lithologies de la séquence kaolinique sous 3 lithotypes.	232
Tableau VI.14 Proportions des lithotypes de la séquence kaolinique	232
Tableau VI.15 Comparaison des proportions des lithotypes de la séquence kaolinique, sur les CPV	234
Tableau VI.16 Statistique sur les contacts des lithotypes de la séquence kaolinique	234
Tableau VI.17 Proportion des lithotypes simulés dans chaque réalisation de simulation	238
Tableau VI.18 Proportion des lithotypes simulés dans chaque réalisation de la simulation faite sur la séquence kaolinique	238
Tableau VI.19 Effectif des contacts verticaux entre les fourchettes d' Al_2O_3	240
Tableau VI.20 Effectif des contacts verticaux entre les fourchettes d' Al_2O_3	241
Tableau VI.21 Regroupement des classes d'argile sous 4 groupes.	241
Tableau VI.22 Proportions des groupes utilisés pour la simulation	241
Tableau VI.23 Comparaison des proportions des groupes du gisement, sur les CPV	242
Tableau VI.24 Statistique sur les contacts des groupes du gisement	243

I. INTRODUCTION GENERALE

1.1. Introduction

Après le silex et la pierre taillée, l'argile fut, pendant la préhistoire, le matériau le plus anciennement utilisé par les hommes. L'archéologie nous présente d'innombrables poteries, statuettes étranges, constructions gigantesques comme les ziggurats (tour de Babel), (Encyclopédie Universalis: Millot 2002).

La définition de l'argile est double ; une roche sédimentaire meuble, imperméable, grasse au toucher, imbibée d'eau et qui peut être façonnée (Le petit Larousse 1997). Du point de vue géologique, l'argile est une roche sédimentaire, composée pour une large part de minéraux spécifiques, aluminosilicates plus ou moins hydratés, eux-mêmes nommés argiles.

Les roches argileuses présentent une grande diversité : diversité de compositions et de propriétés, diversité dans leur nomenclature et diversité dans leurs applications industrielles. Le kaolin est une roche argileuse, en général blanche et friable, composée essentiellement des minéraux de la famille de la kaolinite. Les impuretés des kaolins sont le quartz, le mica, d'autres minéraux argileux surtout des illites, les oxydes de fer et de titane, et l'hydroxyde de fer. La production mondiale du kaolin dépasse de 23 millions de tonnes dès 2004.

Le kaolin ou « china clay » est une roche kaolinique presque pure. Chimiquement inerte, elle est utilisée pour donner de la blancheur et de l'éclat dans les céramiques, les peintures et les papiers de haute qualité.

Les « ball clays » sont des argiles plastiques constituées principalement de kaolinite avec une contribution mineure d'illite. Ces argiles assurent la plasticité nécessaire à la mise en forme et la cohésion avant cuisson. Elles jouent également un rôle de ciment des composés réfractaires lors du chauffage (King, 2006).

Le kaolin commercialisé est un produit exclusivement constitué de kaolinite issue de l'altération des aluminosilicates (Bertont et Le Berre, 1983). Le niveau d'exigence et la sensibilité à la présence d'impuretés dépendent de l'usage destiné au kaolin. Le kaolin comme la plupart des minéraux industriels est extrait dans des carrières, et est utilisé dans des procédés qui exploitent ses propriétés intrinsèques ou améliorées par des traitements légers. La sélection optimale des qualités en carrière nécessite une bonne évaluation de la variabilité des substances en place (Delineau, 1994). La gestion raisonnée du mélange et la classification des réserves réclament une bonne compréhension du rôle des impuretés et des relations entre celles-ci et les propriétés physico-chimiques du kaolin.

L'objet de ce mémoire concerne la caractérisation, l'estimation et la valorisation des gisements d'argiles kaoliniques du bassin des Charentes et en particulier l'amélioration des connaissances des variabilités chimiques, minéralogiques et lithologiques de ces argiles en liaison avec les nécessités de la production et du traitement.

Ce travail a été mené avec le soutien et pour le compte de la Société AGS Minéraux

1.2. Position du sujet

Des argiles kaoliniques sont exploitées depuis une centaine d'année, dans la partie occidentale du bassin des Charentes, elles appartiennent à un réseau paléo-deltaïque. Le matériel extrait des carrières subit divers traitements : émottage, fragmentation, classification, séchage, cuisson éventuelle à diverses températures avec rebroyage et criblage.

Ces argiles sont commercialisées sous cinq catégories principales : argiles crues déchiquetées, argiles broyées (et séchées), argiles calcinées/métakaolin (calcination à moins de 1100°C), chamottes brutes (calcinées à plus de 1400°C) et les chamottes broyées utilisées toutes deux en sanitaire.

Les argiles kaoliniques des Charentes ont été le sujet de différentes études scientifiques. Kulbicki (1953) a étudié la constitution et la genèse des sédiments argileux, sous le titre de faciès sidérolithiques.

L'étude sédimentologique du paléogène nord-aquitain a été faite par Klingeblat en 1966. De 1974 à 1980 un important programme de recherche fut lancé. Il visait à une meilleure connaissance des propriétés cristallochimiques, morphologiques, et de surface des kaolinites des Charentes pour l'emploi dans le couchage du papier.

Les variations des caractères minéralogiques (Marchadour 1980), et le cadre géologique et minéralogique des argiles a été étudié par Dubreuilh et al. (1984).

Dans la même période Yvon et al. (1980), Cases et al. (1982, 1986) travaillent sur la connaissance cristallographique et morphologique des kaolinites des Charentes et l'application de ces argiles comme charge minérale dans le caoutchouc.

Les éléments traces associés aux kaolinites ont été étudiés par Mosser (1982), Allard et al (1992) et Delineau (1994).

Les publications sur le traitement de ces argiles sont très rares, Grain (1982) a étudié la préparation industrielle des argiles kaoliniques par voie sèche. Dubreuilh (1987) fait sa thèse de doctorat sur la synthèse paléogéographique et structurale des dépôts à l'échelle du bassin d'aquitaine. Delineau (1994) poursuit les études d' Yvon et al. (1980), de Cases et al. (1982), de Grain (1982), de Dubreuilh (1980) et de Dubreuilh et al (1984) sur la caractérisation et la classification des argiles kaoliniques. Il concentre une partie de son travail sur les argiles hyperalumineuses qui échappent au cadre de la classification traditionnelle et posent des problèmes de fabrication.

D'une façon générale on constate que seule une petite partie des argiles rencontrées par les forages de prospection est susceptible de donner un produit commercial (1% voir moins pour les kaolins de Géorgie par exemple). Pour assurer la production mondiale annuelle qui est de l'ordre de 23 à 24 millions tonnes, les producteurs sont confrontés à un défi permanent, d'autant qu'ils ont besoin d'un minimum de réserves.

L'exploitation intensive des kaolins les meilleurs et les plus accessibles a épuisé les gisements de haute teneur et de faible recouvrement. Les gisements actuellement en extraction sont plus riches en alumine que ceux étudiés par Delineau (1994).

Les argiles hyperalumineuses ne sont pas nouvelles dans le bassin, mais deviennent de plus en plus fréquentes dans les gisements actuels. C'est la conséquence de l'exploitation des gisements plus profonds. Les gisements situés à la bordure du bassin et donc sous une faible couverture exploités dans les décennies précédentes étaient pauvres en ce faciès d'argile. D'où la nécessité d'une meilleure compréhension de la formation des gisements kaoliniques des Charentes.

La prospection de nouvelles réserves devient pour beaucoup d'exploitations une clé stratégique de développement. Pour minimiser la probabilité de perte, il faut investir sur la prospection de bonnes cibles. Pour trouver ces cibles on ne peut s'appuyer que sur des informations géologiques, géochimiques ou géophysiques. Les indices géologiques sont les plus importants et les plus utilisés pour la prospection des réserves de kaolin.

L'exploration est une activité économique impliquant le risque et l'incertitude. Les nouveaux gisements présentent une variation plus importante de la teneur en alumine. Cette variation pose un problème d'estimation et de classification des ressources qui entraîne certaines difficultés dans la fabrication des chamottes.

Pour baisser la variation de la teneur d'une part, et réduire d'autre part l'erreur de la prévision de la teneur d'alimentation de l'usine, AGS met en place des stocks de préhomogénéisation pour chaque classe d'argile. La question qui se pose est celle du critère souhaitable pour la classification des matières extraites. Dans la pratique, le chef de carrière possède une copie de la fiche d'analyse des sondages

carottés. La méthode actuelle est basée sur la définition d'une zone d'influence autour d'un échantillon. Cette zone sera exploitée et classifiée en utilisant la valeur de l'échantillon du sondage. La méthode du polygone d'influence ou du voisin le plus proche n'est pas une méthode optimale pour cette étape de l'estimation, et surtout pour la sélection (Armstrong 1997).

L'expérience des exploitants et l'observation visuelle des affleurements des différentes lithologies d'argile leur permettent de corriger d'une partie des erreurs de la classification. Mais les études statistiques présentées au troisième chapitre montrent que cet outil est perfectible.

La géostatistique étant utilisée depuis longtemps pour l'estimation des gisements miniers, a prouvé sa capacité dans ce domaine. Toutefois, l'application des outils géostatistiques dans le domaine des minéraux industriels n'est pas si fréquente et dans le cas du kaolin on dispose de peu d'études publiées. Pour les calculs de la géostatistique, le logiciel ISATIS a été utilisé avec l'autorisation de Géovariances.

Ce travail cherchera à identifier l'origine de ces variations et à proposer une estimation plus apte à l'évaluation et la classification des réserves d'argile.

1.3. Objectifs de l'étude

L'étude concerne les gisements kaoliniques du bassin des Charentes. Les secteurs à hauts potentiels sont choisis sur les critères géologiques. Les gisements de kaolin sont usuellement localisés par sondages. Le projet de prospection du bassin des Charentes comporte 6 profils de sondages espacés de 2 à 3 km, sur lesquels un sondage carotté est effectué chaque 500 m. Ces sondages sont utilisés pour le suivi de l'évolution des séquences sédimentaires, la forme du substrat calcaire et la définition des cibles d'exploration par les sondages plus serrés. Le système utilisé pour l'acquisition des échantillons est le carottage avec un carottier qui a une capacité d'un mètre et demi d'échantillon que l'on peut remonter à la surface par un extracteur lié à un câble. Seuls les échantillons qualifiés de "kaolin commercial" sont analysés. La longueur des échantillons est variable, elle dépend de leur continuité et de leur homogénéité apparente. La variation des critères visuels est représentée par un code lithologique et un code de couleurs. Les détails sont enregistrés en tant que commentaires (ou remarques) dans la fiche de sondage. La zone d'exploitation est choisie à partir des données de sondages. Les dimensions et la direction de celle-ci sont définies par le chef de carrière à partir d'une analyse des données des sondages précédents et de la variation de critères visuels comme la couleur, la présence de matériaux grossiers (sable) et la taille des "rognures" d'argile en la grattant avec un couteau.

Dans les gisements sans argile hyperalumineuse, la relation entre les codes lithologiques et la teneur en alumine reste simple, cela veut dire que la moyenne de la teneur des codes reste très proche d'un gisement à l'autre, et l'écart-type de la teneur des échantillons dans chaque gisement et pour un code lithologique donné, est relativement faible. Cela permettrait aux exploitants d'utiliser ces critères comme un outil de contrôle de la teneur.

Dans les gisements subissant des phénomènes de post sédimentation (signalés par la formation de gibbsite et le lessivage de la potasse et du fer), la relation traditionnelle de la teneur et des codes lithologiques n'est pas respectée. Cela peut être constaté de deux façons différentes : d'une part, à cause de l'augmentation de la teneur en alumine pour toutes les lithologies, même dans les argiles pauvres en alumine avec une proportion non négligeable de sable (les argiles très maigres ou maigres) ; d'autre part du fait de la variation de la teneur qui devient très importante. Ces changements remettent en question la correspondance entre la teneur et les codes lithologiques utilisés. Le décalage de la moyenne est facile à adapter, mais la variance importante de la teneur perturbe la précision de la prévision de la teneur des zones exploitées par la méthode actuelle.

L'idée initiale des études réalisées dans le cadre de ce mémoire vise à améliorer la prévision de la teneur, et donc la qualité des produits issus des argiles kaoliniques du bassin des Charentes.

1.4. Objets de l'étude

On essaye dans ce mémoire de trouver des méthodes permettant de mieux gérer l'incertitude sur la prévision de la teneur et de la qualité de l'argile. Dans ce contexte on va aborder les problématiques suivantes :

- Compte tenu de l'aspect relativement nouveau des faciès hyperalumineux, il reste des questions sur leur genèse. Il reste aussi des questions sur les effets des agents géologiques sur les autres faciès. Le cadre de cette étude ne permettait pas des études expérimentales détaillées sur ces argiles. On essaie d'améliorer la connaissance de cette famille d'argile par des analyses statistiques des données disponibles et une étude bibliographique sur les gisements similaires.
- Un autre problème est le comportement variable des argiles à la cuisson, cela a fait l'objet d'un sujet d'étude parallèle entre le Centre des Matériaux de Grande Diffusion (CMGD) de l'Ecole des Mines d'Alès (EMA) et la société AGS-Minéraux. Cette étude ne fait pas partie de cette thèse. Les études statistiques de la variabilité des paramètres statistiques d'un gisement à l'autre, en relation avec les espèces minérales présentes dans les différentes argiles, ont permis d'apporter certains éléments de compréhension à ce sujet.
- Avant de lancer les calculs de réserves, il est important d'examiner la fiabilité des données et une critique de la méthode d'acquisition des données. Comme on a vu précédemment, tous les échantillons ne sont pas analysés. Dans la base de données, les données anciennes ne sont pas complètes, l'analyse chimique n'a pas été faite de façon identique pour tous les échantillons et certains éléments ne sont pas dosés (comme le SiO_2). Ces lacunes d'informations rendent difficile la tâche d'analyses statistiques des données et limite la connaissance générale des différents gisements.
- L'analyse des seuls échantillons qualifiés de "kaolins commerciaux" amène à s'intéresser au traitement des lacunes d'information. Ce manque d'information sera important au moment de l'interpolation des données du voisinage d'une cible d'extraction. Dans la méthode actuelle, les valeurs des échantillons non analysés sont remplacées par des valeurs par défaut. Cela entraîne un biais d'estimation et masque la variance et la relation spatiales entre les données.
- La taille différente des échantillons est un autre problème de la méthode d'échantillonnage. Dans les méthodes d'évaluation basées sur la statistique classique, la pondération des échantillons par leur longueur peut être une réponse, mais on sait que ces méthodes négligent une réalité très importante : la relation volume-variance. La régularisation de la teneur sur un support de taille fixe est le choix classique des méthodes de la géostatistique. Le découpage des échantillons de grande longueur en

segments plus petits de même valeur de teneur, crée également des artefacts. Un exemple comparatif de calcul de la teneur par la méthode actuelle avec celle mesurée sur une longueur fixe des échantillons permet de démontrer le niveau de sensibilité au choix de la taille de régularisation des échantillons.

- Les critères visuels de la classification des argiles ne correspondent pas toujours avec des classes définies de teneur. Comme déjà mentionné, cela était le cas pour les gisements anciens. Le problème est de savoir quels changements peuvent perturber cette correspondance et de définir le niveau de fiabilité de ces critères dans les nouveaux gisements.
- Le comportement d'une argile, lors de son traitement thermique, est contrôlé par de nombreux paramètres cristallochimiques et minéralogiques. Chaque impureté peut jouer un rôle parfois décisif sur le comportement des argiles. Il n'existe pas d'analyse quantitative minéralogique des argiles kaoliniques : la composition minéralogique est définie à partir de l'analyse chimique de l'argile en se basant sur certaines hypothèses sur les minéraux principaux. Une étude bibliographique a permis de souligner l'importance de la composition minéralogique et des paramètres cristallographiques sur le comportement de l'argile.
- La genèse des gisements de kaolin du Bassin des Charentes obéit à des règles géologiques simples mais leur géométrie détaillée présente une grande complexité, renforcée par le fait qu'on doit distinguer des argiles de qualités très différentes. La définition des limites d'un gisement, la forme géométrique complexe des dépôts et la relation non cartésienne entre les données pose le problème de l'adaptabilité des outils géostatistiques à ce milieu.
- La régularisation classique des échantillons de longueurs différentes à un support d'estimation d'une longueur fixe, ne convient pas aux exigences de la sélection et de l'extraction maximale de réserves. L'impact de la régularisation sur la forme du variogramme est analysé. Une méthode d'estimation de la puissance du kaolin et de l'accumulation de la teneur par des passées de 2m d'épaisseur, qui tient compte des pratiques d'extraction d'AGS, sera présentée.
- La teneur des substances est mesurée par la spectroscopie de fluorescence de rayons X (SFX), et rapportée en oxyde sur un support d'analyse calciné à 1100°C. La perte au feu est mesurée par l'écart de la masse d'échantillon séchée à 110°C, avant et après la cuisson à 1100°C. La composition des substances de l'échantillon calciné est rapportée à 100%. La masse ou le volume (la variation de la densité est négligée) des matériaux exploités sont calculés en utilisant la masse ou le volume in situ et donc brut. Cela rend les calculs de la moyenne de la teneur d'un mélange, ou d'une estimation, plus compliqués. Autrement dit les variables mesurées ne sont pas des variables additives. La question est de savoir la précision d'une estimation directe de ces variables non additives, et les circonstances dans lesquelles une estimation directe de ces variables pourrait être considérées comme acceptables.

- Après avoir étudié les paramètres statistiques des différents gisements, la question qui suit est celle de la variation spatiale des données. L'étude variographique des gisements peut apporter une réponse à l'origine de la difficulté des méthodes actuelles sur la prévision des teneurs. On ne peut pas appliquer le même système de pondérateurs d'interpolation de la teneur à un gisement de type nappe et sans argile hyperalumineuse, et à un gisement complexe tel que le gisement de Bois des Rentes. La différence de forme des variogrammes explique très bien la difficulté de la prévision de la teneur par la méthode actuelle. Les exploitants cherchent à automatiser le processus d'estimation, mais ont pu par le passé négliger l'étude structurale. La sensibilité au choix du modèle est examinée dans le cas d'un gisement complexe et bien délimité.
- Chaque opération de forage avec les matériels qui sont en possession d'AGS coûte environ 45 €/m, et les frais d'analyse sont évalués à presque 100 € par échantillon. Il est important pour les décideurs de savoir à quelles étapes dans la reconnaissance des gisements, la diminution de la maille de sondages apporte le maximum d'information et quelle est la taille optimale pour le niveau de précision recherché. Pour répondre à cette question trois gisements de types différents ont fait l'objet d'une étude de la variance d'estimation sur les quatre éléments essentiels à la définition des choix de qualité industrielle du kaolin.
- Une des réponses pratiques pour réduire la variation de la teneur est la constitution de stocks d'homogénéisation ou de mélange. AGS pratique depuis un certain temps des stocks ciblés d'argiles. Chaque stock contient des argiles d'une classe définie (des fourchettes de la teneur en Al_2O_3). À la condition d'une sélection correcte, la variation de l'alimentation de l'usine peut être réduite et la moyenne sera plus proche de la moyenne prévue. La méthode actuelle, basée sur le critère de la valeur ponctuelle analysée (carotte) qui sert de repère pour les contrôles visuels sur le terrain et permet de définir les limites de la zone à exploiter, n'est pas très satisfaisante. Le krigeage utilise une combinaison pondérée des données voisines et s'appuie sur les résultants du krigeage d'indicatrice du kaolin/stérile. Les données d'une réalisation d'exploitation ne sont pas disponibles. Pour pouvoir comparer teneur estimée et teneur réelle, on propose d'utiliser les résultats de la simulation. La moyenne et l'écart-type de la teneur de chaque stock donnent des critères préliminaires pour juger de l'aptitude de chacune de ces méthodes.
- Vues la complexité des dépôts d'argile et la relation spatiale entre les faciès, il est toujours question de la quantification du risque d'une interpolation lithologique. Les méthodes de simulation des variables catégorielles nous permettent d'apporter certaines réponses à cette question, en sachant que la variation de la teneur à l'intérieur d'une famille d'argile est moins importante qu'entre les familles. C'est pourquoi une estimation de la répartition spatiale de ces faciès et les relations entre eux sont jugées très utiles pour mieux comprendre la géologie du gisement et le contrôle de la teneur. La simulation permet de visualiser les interpolations possibles des faciès. Le risque de la présence d'un faciès défini peut être exprimé en termes de probabilité. Cela donne des informations concernant l'importance de la variation possible.

- Les nouveautés de ce travail se trouvent
 - dans les études détaillées des relations statistiques des variables dans les gisements et en les comparant à l'échelle du gisement, une attention spéciale est portée aux argiles hyperalumineuses. Les variations chimiques d'un gisement à un autre permettent de mieux comprendre la différence entre les gisements. La chute de la teneur en K_2O et en Fe_2O_3 dans les argiles hyperalumineuses les distingue des autres argiles.
 - dans l'application de la géostatistique. L'utilisation de ces outils est peu mentionnée dans les minéraux industriels et encore moins fréquente dans le cas du kaolin. Les études géostatistiques sont faites pour la première fois sur les gisements kaoliniques des Charentes.

1.5. Démarche suivie

Compte tenu de la définition du sujet, le plan général de recherche fut le suivant :

- Inventaire géologique sur les gisements en exploitation et les carrières anciennes du bassin des Charentes, étude de la méthode de prospection et d'exploitation. Participation au processus de l'acquisition des données, des sondages, à la préparation des carottes et l'analyse des échantillons pour comprendre le système actuel, pouvoir en critiquer certains aspects et les prendre en considération pendant l'analyse des données.
- Etude des données de la base de sondages d'AGS qui se compose des données d'analyses chimiques, et de certaines propriétés techniques pour le gisement de Chez-Arlot et Chez Maudet. Une introduction à l'analyse statistique des données de ces gisements, une analyse critique sur l'acquisition des données et des analyses chimiques.
- Développement des études d'analyse statistique à l'échelle du bassin, par faciès de kaolin et par gisement : études bibliographiques détaillées sur la formation des argiles kaoliniques. A titre d'exemple nous présenterons les théories de la formation des kaolins de Géorgie aux Etats-Unis.
- Participation à la formation spécialisée en géostatistique (CFSG) permettant d'approfondir la connaissance des outils géostatistiques, suivie au centre de géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris.
- Concentration des études géostatistiques sur le gisement de Bois des Rentes (BDR) un des plus grands gisements d'AGS, actuellement en exploitation.
- Etude d'une zone bien échantillonnée de BDR-ouest, utilisée pour préparer un fascicule d'introduction à la géostatistique pour le bureau d'étude d'AGS. Le but de ce rapport était d'expliquer les points pratiques de l'application de la géostatistique sans entrer dans le détail des calculs en utilisant le cas d'étude en question.
- Etude sur la sensibilité de l'estimation à la dimension de la maille de sondage et au choix de modèle du variogramme. Développement d'un logiciel simple pour mieux comprendre le comportement du poids de krigeage.
- Extension des applications des outils géostatistiques pour quantifier le risque de la classification.

1.6. Plan de la thèse

Ce mémoire débute par une revue bibliographique sur la prospection, l'exploitation et le traitement du kaolin. On a consacré une grande partie du premier chapitre à présenter les applications du kaolin et les paramètres importants dans chaque cas d'application avant d'aborder la situation mondiale de l'économie du kaolin.

Le deuxième chapitre porte sur la géologie du bassin et des gisements d'argiles des Charentes. Les lithologies kaoliniques du bassin des Charentes sont décrites. Dans ce chapitre on revient sur la formation des argiles kaoliniques, avec les exemples des gisements sédimentaires du Brésil et de Géorgie, afin d'extraire des idées pour mieux comprendre la genèse des gisements charentais. La gibbsitisation dans le sol et les sédiments est particulièrement étudiée pour améliorer la connaissance de la formation des argiles hyperalumineuses.

Le chapitre trois décrit l'acquisition des données, les analyses statistiques des substances chimiques et la lithologie des gisements (anciens et actuels). On présente une comparaison entre les paramètres statistiques mono-variables des gisements. Ensuite la relation à deux dimensions est analysée, puis on présente l'analyse en composantes principales

Le chapitre quatre porte sur l'analyse structurale et l'estimation du gisement BDR. Les questions importantes sur l'utilisation des méthodes de la géostatistique dans le cas des gisements de kaolin sont examinées, et la différences de la variabilité spatiale entre les gisements est décrite. Le choix de la maille optimale de sondage est abordé par l'analyse de l'écart-type de l'erreur d'estimation.

Le chapitre cinq se compose de deux parties. La première porte sur l'impact du choix de la sélection et de la classification des réserves sur la moyenne et l'écart-type des stocks ciblés de kaolin dans deux types de gisements complètement différents.

La deuxième partie porte sur la simulation des variables catégorielles, et présente les résultats des études de la simulation plurigaussienne sur les lithologies et les classes en teneur d'alumine dans le gisement BDR.

II. LES ARGILES KAOLINIQUES ET LEURS USAGES

Avant d'entrer dans le détail de la géologie des gisements kaoliniques des Charentes, on présente dans ce chapitre, le kaolin et ses usages. Cela permet aux lecteurs non initiés au sujet, de faire connaissance avec les termes techniques.

Les méthodes de la prospection et de l'exploitation des argiles kaoliniques sont brièvement présentées, une partie est consacrée aux techniques de traitement du kaolin. Ce chapitre s'achève avec une présentation globale de la production et du marché mondial de kaolin.

Un des objectifs de ce chapitre est de mieux comprendre la relation entre les propriétés industrielles souhaitées, la composition des dépôts in situ, et les comportements des divers types d'argiles aux différents traitements thermiques qui leur sont appliqués.

II.1. Argiles

Le terme Argile trouve son origine dans le mot grec Argilos dont la racine Argos signifie blanc. L'argile est une matière première depuis la plus haute antiquité dans toutes les civilisations ; c'est ainsi que les plus anciennes céramiques du monde ont été découvertes sur les berges du fleuve Amour en Russie orientale. Trois sites sont à noter : Gasya, Gromatukha et Chemigovka. Les datations radiocarbone sont de 10.875-12.960 BP pour Gasya, 10.400-13.300 BP pour Gromatukha et 8.000-11.000 BP pour Chemigovka (Hyland et al.). En Extrême-Orient, on a trouvé des figurines datées de - 10000 ans. On a signalé des découvertes d'objets en argile, au Proche Orient, au bord du Niger, dans le Hoggar vers -9300 ans et un peu plus tard, au Sud-Ouest du Fezzan. (Caillère et al. 1989)

Les constituant des argiles sont des minéraux, qui sont extrêmement petits (Meunier 2006). Pour en connaître la nature, la structure et la classification, il fallut attendre les techniques raffinées qui se sont offertes aux minéralogistes au XX^{ème} siècle. Les minéraux argileux sont en forme de feuilles ou de lattes microniques, d'où leur nom de phyllites. Ils appartiennent, comme les micas au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal est composé de quelques centaines de feuillets empilés, de taille nanométrique. C'est la structure du feuillet élémentaire qui caractérise l'espèce minérale. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches planes associées (Millot 2002).

Il existe deux sortes de couche, selon que les oxygènes ou hydroxyles sont associés en tétraèdres ou en octaèdres. Dans la couche tétraédrique la cavité des tétraèdres est occupée par le cation silicium, qui peut être substitué par de l'aluminium. Dans la couche octaédrique la cavité octaédrique est occupée par des petits cations de (Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+}). Au cas où les charges positives et négatives ne s'équilibrent pas, il en résulte une charge du feuillet et d'autres cations viennent se loger entre les feuillets pour équilibrer l'édifice. Ici résident les capacités d'échange des argiles et leur pouvoir adsorbant.

Les minéraux de la famille de la kaolinite : kaolinite, halloysite, dickite et nacrite sont des minéraux à deux couches. Une couche tétraédrique à cœur de silicium et une couche octaédrique à cœur d'aluminium. La formule chimique structurale est $Si_2Al_2O_5(OH)_4$. L'équidistance interfoliaire est de 7 Å.

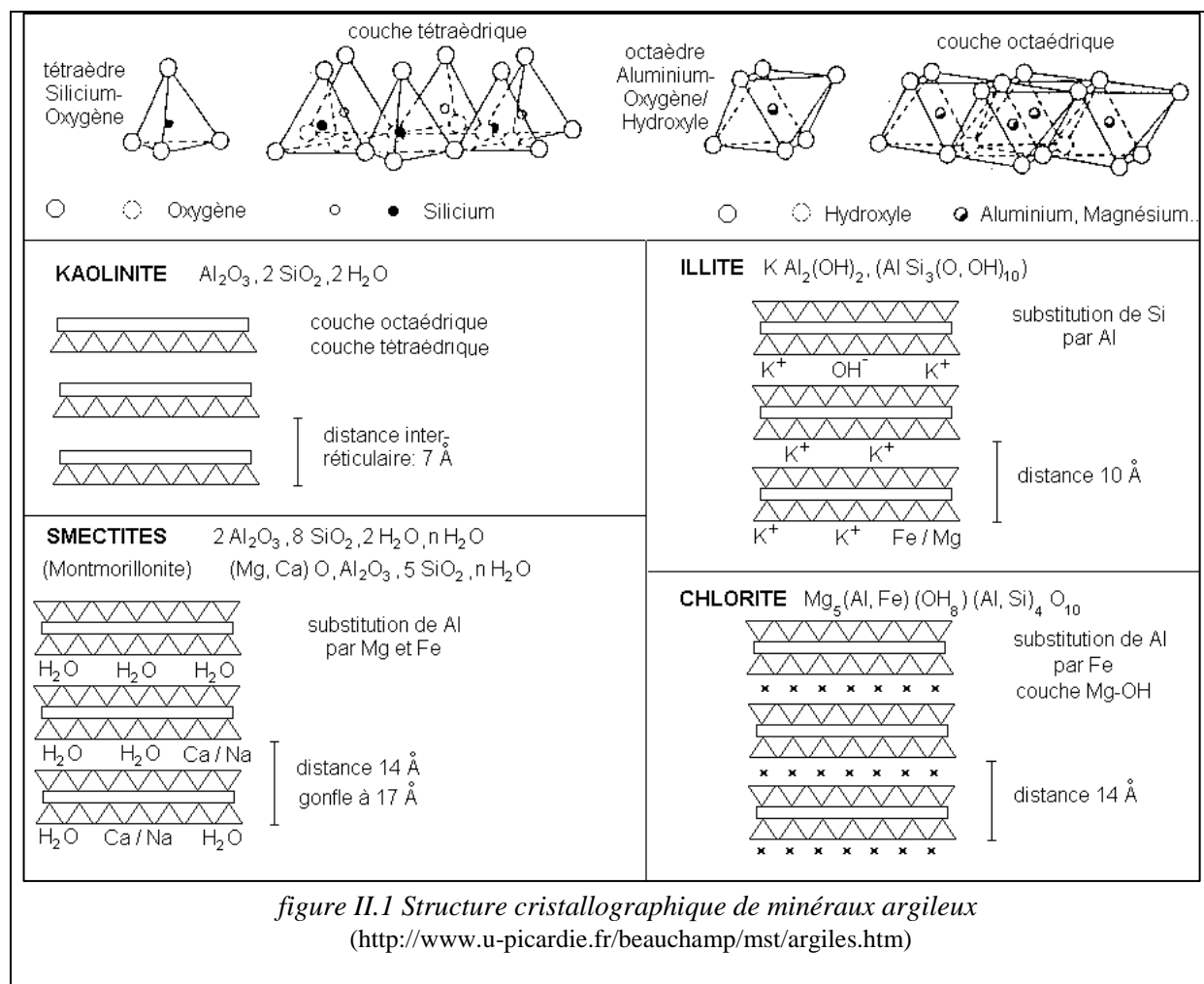
Les illites sont des argiles à trois couches, une couche octaédrique associée avec deux couches tétraédriques dans lesquelles une partie des siliciums est remplacée par des aluminiums. Les ions aluminium de la couche octaédrique peuvent être remplacés par les ions Mg et Fe et des ions de potassium assurent la neutralité de l'ensemble, en positions interfoliaires. L'équidistance interfoliaire est de 10 Å.

Les smectites ou la famille de montmorillonites sont bâties sur le même modèle que les illites. La variation de composition du groupe des smectites est liée à la présence de différents cations échangeables, faiblement retenus étant donné la faible charge cationique. Les smectites comprenant des cations divalents Mg ou Ca contiennent 2 couches d'eau dans l'interfoliaire. L'équidistance interfoliaire est de 14-15 Å. Par contre, les smectites avec des cations monovalents comme le Na ne contiennent qu'une seule couche d'eau ($d = 12 \text{ Å}$). La figure II.1 présente la structure cristallographique de ces trois familles d'argile. Le Tableau II.1 donne une classification brève des argiles.

Les minéraux argileux sont parmi les plus importants, sinon les plus importants, de nos minéraux industriels. Des millions de tonnes sont utilisés annuellement dans une grande variété d'applications.

Les progrès de la technique, tant en ce qui concerne le traitement des matières premières que l'élaboration de produits nouveaux, élargissent sans cesse le domaine de leurs applications (Javy C. 1971).

Ces minéraux ne se rencontrent pas isolément, mais dans des roches composées d'un mélange de minéraux typiques des argiles et d'autres minéraux ou matériaux associés (quartz, oxydes de fer, calcite, débris végétaux).



Les argiles comme la plupart des minéraux industriels sont utilisées sans subir de processus très compliqué de traitement. Ceux-ci se limitent souvent à des opérations de broyage et sélection, à sec ou par voie humide, et à un contrôle de la granulométrie.

Tableau II.1 Classification sommaire des minéraux argileux

Principales familles		espèces minérales				
		Composants dominants				
		Si et Al	Si, Al, Fe et Mg	Si, Al et Mg	Si et Mg	Si, et Fe
Minéraux à 2 couches		Kaolinite halloysite	Berthiérine (chamosite)	Amosite	Serpentine (antigorite) (chrysolite)	Greenalite cronstedite
Minéraux à 3 couches	Illites et vermiculite	Illites vermiculite	Illites vermiculite	Vermiculite		Glauconite (céladonite)
	Smectites	Montmorillonite	Beidellite	Saponite	Stevensite hectorite	Nontronite
	Chlorite	Chlorite	Chlorite (clinochlore)	Chlorite	Chlorite (pennine)	
	Pyrophyllite et talc	Pyrophyllite			Talc	
Minéraux en lattes				Attapulgite	Sépiolite	

II.2. Kaolin

Selon le livre de minéralogie de Dana (1977), le terme kaolinite est dérivé du terme kaolin qui est une corruption du mot chinois "kauling" qui signifie haute crête. Ce type d'argile, a été exploité à l'origine dans un terrain granitique altéré à proximité d'un village appelé Kauling (Chen et al. 1997).

Les kaolins sont des roches composées en grande partie des minéraux du groupe du kaolin, qui sont la Kaolinite, l'Halloysite, la Dickite et la Nacrite ($d = 7 \text{ \AA}$). Le minéral le plus commun des kaolins est la kaolinite. Les autres membres du groupe du kaolin sont relativement rares, bien que quelques occurrences à Halloysite (Murray et al. 1977 ; Wilson 2004 ; Wilson et al. 2006), à Dickite (Choo et Kim, 2004), et à Nacrite (Hanson et al. 1981) soient, ou aient été, exploitées.

Le terme « China Clay » est utilisé comme synonyme de kaolin (H.H. Murray 1999). Selon la dimension des particules de kaolin et la présence de la matière organique, certaines argiles kaoliniques peuvent être très plastiques et prennent le nom de Ball Clay. Fire Clay est un terme général utilisé pour les argiles réfractaires, mais il désigne plus précisément les argiles réfractaires et plastiques. Flint clay désigne une argile réfractaire dure, non plastique, et ressemblant au silex. Les argiles réfractaires qui se forment sous les couches de charbon sont connues sous le nom de « under-clay » (voir aussi, Loughnan 1978).

Agnello (2005) propose la classification présentée dans le Tableau II.2.

Tableau II.2 Nomenclature des argiles réfractaires et densité apparente (d'après Agnello, 2005)

Type d'argile	densité apparente
Flint clay	> 2.32
Semi-flint fireclay	2.00 - 2.32
Semi-plastic fireclay	1.90 - 2.00
Plastic fireclay	< 1.90
catégories	Teneur en alumine des argiles réfractaires/ contenu en Al_2O_3 d'argile après calcination (%)
I	I> 44.0
II	44 - 40
III	40 - 38
IV	< 38

II.2.1. Quelques exemples de gisements de kaolin dans le monde

Sumas Mountain, Blue Mountain, Lang Bay, Quinsam, Giscome Rapids (British Colombia), Cypress Hills (Alberta, Canada). Eastend, Wood Mountain, Ravenscrag (Saskatchewan, Canada). Moose River Basin (Ontario, Canada), Shubenacadie Valley (Nova Scotia, Canada), Aiken (Caroline-du-Sud, USA), Wrens. Sandersville, Macon-Gordon, Andersonville (Géorgie, USA), Eufaula (Alabama, USA). Weipa (Queensland. Australie), Jari, Capim (Brésil). (Hora 1998, Montes et al. 2002, Carnerio et al. 2004)

II.2.2. Les gisements de kaolin en France

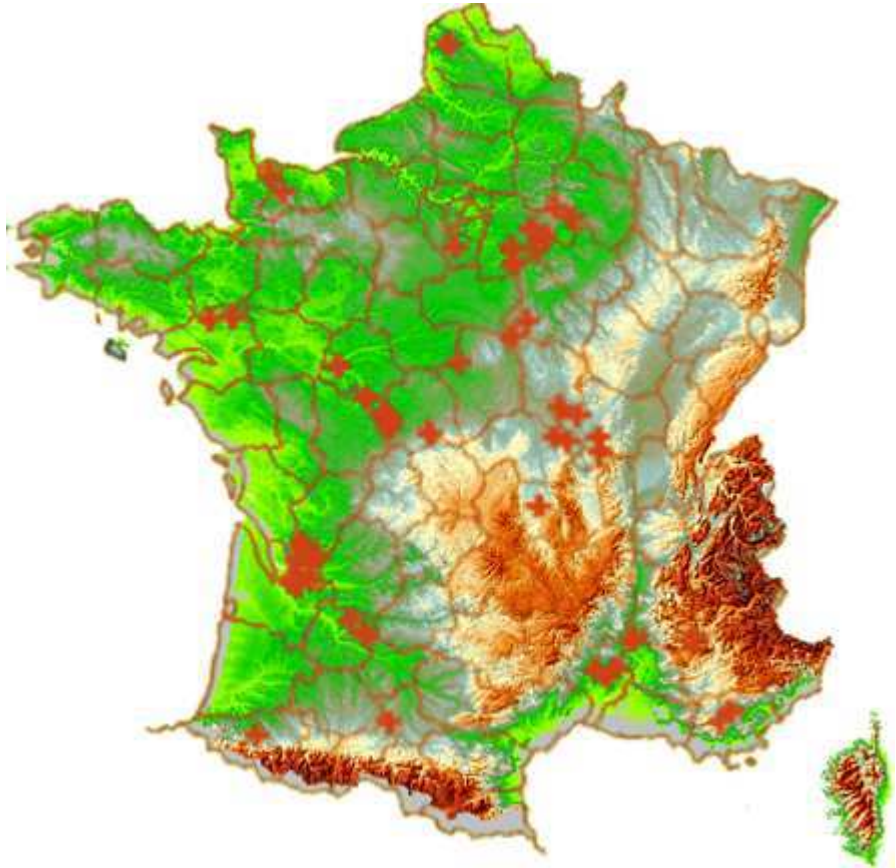
Les principales régions françaises productrices d'argiles pour céramiques fines et réfractaires, en termes de bassin et de départements concernés (voir

figure II.2) sont les suivantes :

- Bassin des Charentes : Charente et Charente-Maritime

- Bassin de Provins : Seine- et- Marne, Marne et Aube (Thiry et Audebert 1996)
- Bassin du Centre Est : Allier, Nièvre, Saône-et-Loire, Yonne et Puy-de-Dôme ;
- Bassin du Centre Ouest : Indre-et-Loire, Indre et Cher ;
- Bassin du Sud Est : Vaucluse, Gard, Var et Hautes-Alpes (Fiche technique de la SIM, 1998a).

*figure II.2 Plan de
situation des
gisements d'argiles en
France
(les gisements sont
représentés par des +
en rouge).*



La plupart des dépôts de kaolin sédimentaire du monde se rencontrent dans le Crétacé supérieur et l'Eocène. Quelques dépôts de "fireclay" et "underclay" sont de la fin de Carbonifère. Des couches de kaolin sont associées à des séquences variées de sable micacé kaolinitique, accompagnées de siltstones, de schiste argileux, de grès et de conglomérats qui se trouvent souvent dans une structuration entrecroisée. Du charbon peut être associé aux couches de kaolin.

La composition des roches kaoliniques est généralement la suivante : la kaolinite est le minéral principal, les autres minéraux sont l'halloysite, le quartz, la dickite, la nacrite, le diaspore, la boehmite, la gibbsite et le mica. La gangue principale est le quartz, puis le mica. Les minéraux suivants ont été observés ; limonite, goethite, feldspaths résiduels, sidérite, pyrite, ilménite, leucoxene, anatase.

Le kaolin commercialisé est un produit essentiellement constitué de kaolinite issue de l'altération des feldspaths (en général) en milieu acide, fortement lessivé. On peut essentiellement avoir à faire à deux origines :

- Les gisements primaires issus de la transformation sur place de roches feldspathiques
- Les gisements secondaires, qui sont les gisements sédimentaires provenant du transport et de la sédimentation de la kaolinite des sources précédentes.

II.3. Propriétés des kaolins industriels

Les utilisations du kaolin sont régies par plusieurs facteurs comprenant la composition minéralogique et les propriétés physiques et chimiques de l'ensemble, celles-ci étant déterminées par les conditions géologiques dans lesquelles le kaolin a été formé,

Les caractéristiques importantes concernant les applications des minéraux argileux sont les suivantes :

La nature et les dimensions des particules, leurs formes, la cristallinité, la chimie globale et celle de la surface des cristaux, la surface spécifique, la charge de la surface et de la bordure. et d'autres propriétés qui en découlent, spécifiques aux applications particulières, telles que la viscosité, la plasticité, la résistance mécanique en vert, la résistance mécanique d'échantillon sec et cuit, l'absorption et l'adsorption, l'abrasivité et le pH.

II.3.1. Couleur

Le kaolin a habituellement une couleur blanche ou proche du blanc. Cependant la plupart du temps, le kaolin est associé à une quantité mineure de minéraux auxiliaires contenant des éléments de transition tels que le fer et le titane dans des oxydes, hydroxydes, oxy-hydroxydes, sulfures et carbonates, on parle alors de fer libre (Lima de Sousa 2005, Delineau 1994). Le fer peut être présent dans le réseau de la kaolinite, on parle alors de fer structural.

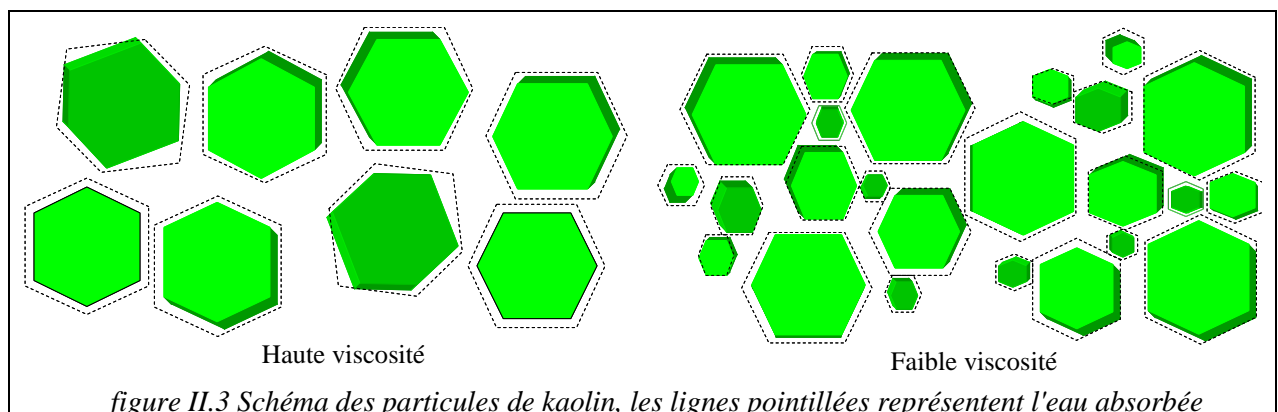
La couleur donnée au kaolin blanc par le couple fer-titane compromet son application dans des industries de la peinture et du papier. Une connaissance de l'état du fer et du titane est très importante pour choisir la méthode de traitement (Chandrasekhar et al. 2006).

Le broyage peut changer les propriétés optiques du kaolin (Breen et al. 2007, Reynolds et Bish 2002, Kalmeneau et al. 1999, Kristof et al. 1993).

II.3.2. Forme et taille

Les cristaux de kaolinite sont plats en forme de minces feuillets de $\sim 2\mu$ d'épaisseur et quelques microns de diamètre, pseudo-hexagonaux, quelques fois en forme de livres ou de piliers vermiculés. Différentes mesures peuvent être utilisées. Le paramètre utilisé pour quantifier la morphologie d'un kaolin a varié au fil du temps (Wilson I. 2006) : en 1980 il s'agissait de l'épaisseur des cristaux, mais dès 1990 l'aspect ratio (rapport du diamètre à l'épaisseur) est devenu plus important.

La distribution granulométrique des particules joue un rôle important sur la viscosité des kaolins en suspension (figure II.3). Aujourd'hui, le rapport de d_{75}/d_{25} est utilisé comme caractère industriel de la morphologie des kaolins traités



II.3.3. Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange de cation (CEC) est définie par le nombre de charges échangeables par une masse donnée d'argile. Elle s'exprime en milléquivalent par 100 g d'argile. Cette caractéristique est fonction de la nature de l'argile (type d'argile), de ses caractéristiques cristallographiques, de ses cations et du pH du milieu. Pour une kaolinite idéale la valeur de la CEC à un pH donné va dépendre uniquement du degré de dissociation des différents sites amphotères situés sur les faces latérales (Casse et al. 1986).

Cette propriété est importante dans le comportement rhéologique des suspensions. Le Tableau II.3 permet de comparer la CEC de quelques argiles. La comparaison entre montmorillonite et kaolin montre l'importance de la présence d'argiles montmorillonitiques, même en faible quantité, sur les propriétés de surface des charges en la suspension et en conséquence, son comportement rhéologique.

Tableau II.3 Capacité d'échange de cation du kaolin, de ball clay et de la montmorillonite

Argile	kaolin	ball clay	montmorillonite
CEC meq/100 gr	3-6	15-40	70-150

II.3.4. Cristallinité

Le niveau d'organisation structurale de la kaolinite est un paramètre utile dans l'industrie du kaolin. Diverses relations ont été employées pour déterminer des « indices de cristallinité », à partir des diagrammes de diffraction X, de courbes d'analyses thermiques différentielles ou de spectres infrarouges. Les indices calculés par diffraction de rayon X (figure II.4) sont les plus couramment employés (Galan et al. 1994). Apparicio et Galan (1999) ont étudié l'influence des minéraux associés à la kaolinite sur la mesure de l'indice de la cristallinité.

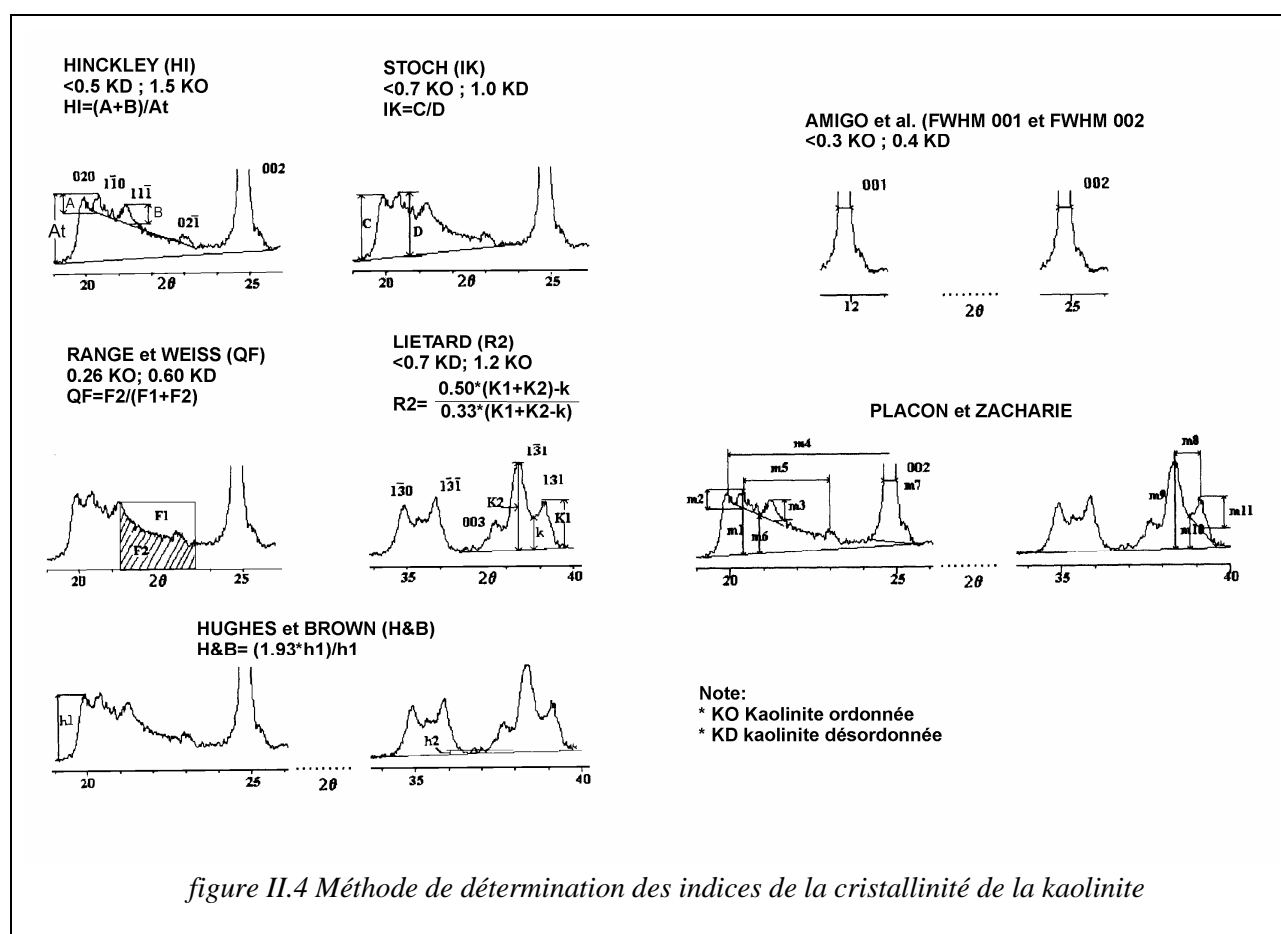


figure II.4 Méthode de détermination des indices de la cristallinité de la kaolinite

La détermination des défauts de la structure et la cristallinité de la kaolinite a fait l'objet de nombreuses recherches depuis 1946, les références peuvent être trouvées dans Plançon et Zacharie 1990, Galan et al. 1994),

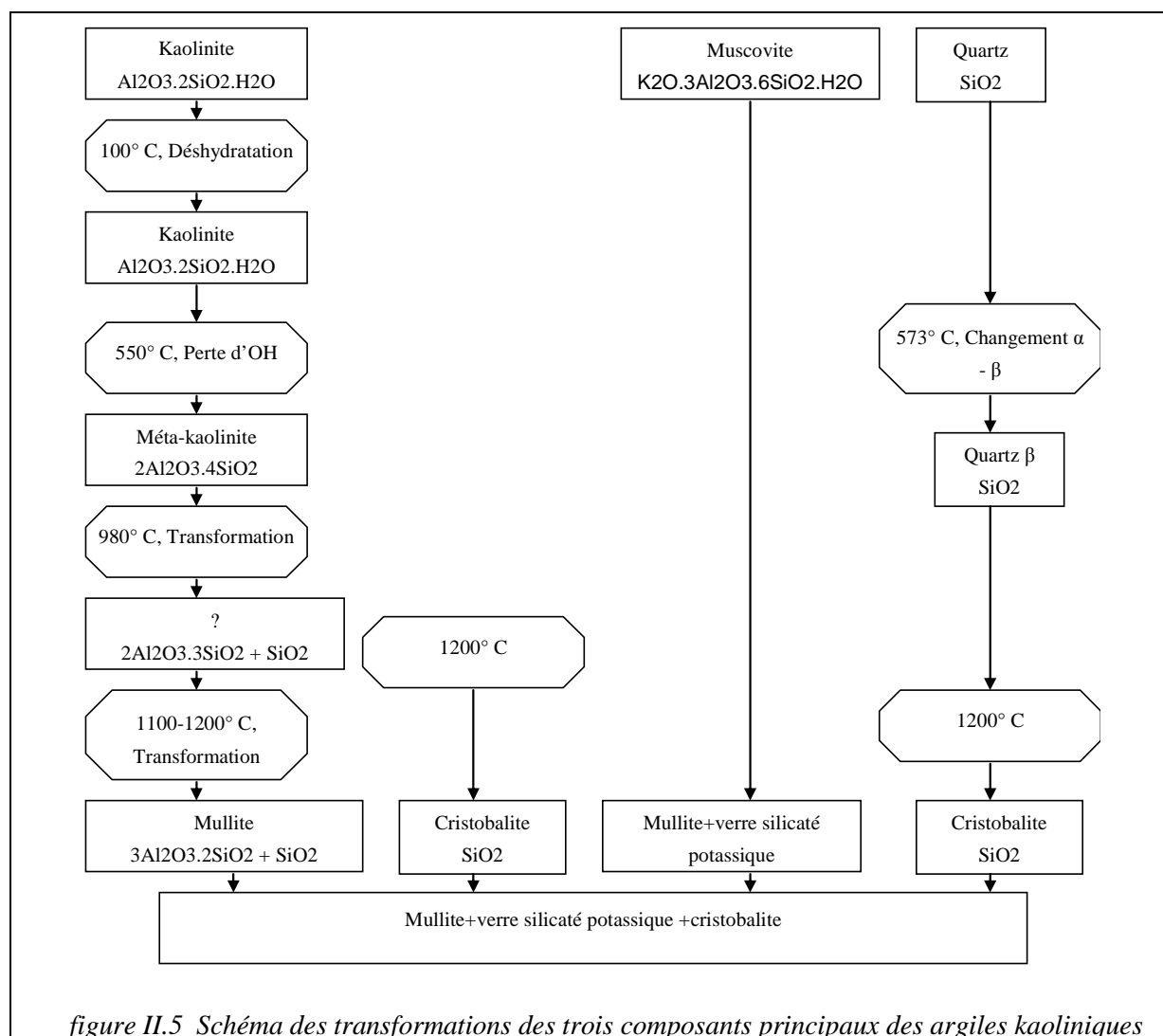
Une relation significative est connue entre la cristallinité de la kaolinite et sa teneur en fer (Mestdagh et al. 1980, Yvon et al 1980). Delineau (1994) a étudié l'état du fer dans les kaolins des Charentes, il a mis en évidence la présence d'une partie du fer dans la structure de la kaolinite, ce qui augmente les défauts de la structure de la kaolinite.

Les relations entre les propriétés cristallographiques et les propriétés morphologiques de la kaolinite ont été étudiées par Cases et al. (1986) et Aparicio et al. (2004). Ils montrent que la cristallinité diminue lorsque augmente la surface spécifique et l'importance des surfaces latérales.

II.3.5. Propriétés thermiques

La kaolinite est un minéral réfractaire (température de liquidus d'environ 1800°C), mais en association avec des minéraux comme les micas, les feldspaths ou les carbonates, la température d'apparition d'une phase liquide lors du frittage se trouve abaissée (Holm 2001).

On peut noter quatre réactions lorsqu'on chauffe une argile kaolinique. Les deux premières sont endothermiques, et les deux dernières sont exothermiques (figure II.5).



L'eau absorbée est éliminée vers 100 °C. A 600°, la kaolinite perd son eau de cristallisation pour donner la métakaolinite. A 980° C environ on a la transformation de la métakaolinite en mullite + Al_2O_3 .

Finalement vers 1200° C on peut observer la transformation rapide de la silice en cristobalite et la réaction entre Al_2O_3 et SiO_2 . Le produit de cette réaction est encore la mullite.

La figure II.5 montre schématiquement les transformations des trois composants principaux des argiles (Aliprandi G. 1979).

II.3.6. Dureté

La kaolinite est tendre avec une dureté entre 1 et 2 (de ~1.5) sur l'échelle de Mohs ce qui signifie que les kaolins relativement purs ne sont pas abrasifs. Cette propriété est très importante dans beaucoup d'applications industrielles. Puisque le kaolin est plus tendre que presque tous les matériaux avec lesquels il entre en contact, l'usure et l'abrasion de l'équipement sont minimal (Murray 1999). La présence de quartz résiduel dans un kaolin industriel modifie bien évidemment ce paramètre.

II.4. Les principaux usages industriels du kaolin

Dans les diverses utilisations du kaolin, chaque utilisateur se concentre sur certaines propriétés. Les propriétés souhaitées et les niveaux d'exigence varient d'une industrie à une autre ; le comportement rhéologique est très important pour l'industrie de céramique, mais cela n'est pas le cas pour la fabrication des réfractaires. Le quartz n'est pas bienvenu dans le kaolin destiné à l'industrie du papier, tandis que sa présence empêche la déformation de la céramique pendant la cuisson (Rahimi et Matin 1989).

Une bonne connaissance de la relation entre les propriétés, et les rôles des composants du kaolin industriel est indispensable pour la commercialisation du produit. La prise de décision appelle une méthode avancée de gestion de risque de décision comme les outils de logique de flou (Taboada et al. 2006).

Parce qu'il est chimiquement inerte avec une gamme de pH de 4 à 9, que sa couleur est blanche ou proche, qu'il a un bon pouvoir couvrant qu'il est doux et non-abrasif, que ses particules sont très fines, il est plastique avec l'eau, réfractaire, et de couleur blanche ou proche après cuisson, qu'il a une faible conductivité thermique et électrique, qu'il est hydrophile et se disperse aisément dans l'eau, que son coût est faible, le kaolin a de très nombreux usages. Quelques utilisations du kaolin sont présentées dans le Tableau II.4.

Tableau II.4 Utilisations industrielles du kaolin (Bundy 1993 et Murray 1999)

Rôle	Utilisation
Couchage	couchage de papier, peinture, encre
charge	charge minérale de papier, caoutchouc, plastiques, polymères, adhésifs, textiles, linoléum
matière première	catalyseur, fibre de verre, ciment, l'industrie du bâtiment, céramiques, plâtre, filtre, émaux, fonderies, production des composés chimiques d'aluminium, production de zéolite
Diluant, adsorbant ou transporteur	polissage, vecteur de médicament, engrais, insecticide, détergents, produits pharmaceutiques, produits de beauté, tannerie des cuirs

II.4.1. Papier

Le plus grand utilisateur du kaolin est l'industrie de papier où il est employé comme matériau de remplissage (charge) dans la feuille et comme couchage à sa surface. Les propriétés qui sont importantes pour le fabricant de papier sont la dispersion, la rhéologie, l'éclat, la blancheur, l'indice de réfraction, la douceur, l'adhésivité, la résistance de la pellicule à la rupture, la réceptivité à l'encre, et la qualité d'impression.

L'industrie du papier est le consommateur mondial principal du kaolin, principalement pour le couchage, mais également comme charge minérale. On l'estime qu'autour 50% de la consommation mondiale de kaolin porte sur les applications dans l'industrie du papier. Il y a trois centres globaux principaux de production de papier de kaolin. Ceux-ci incluent le bassin d'Amazonie au Brésil et la Cornouaille au R-U, mais c'est la ceinture de kaolin de la Géorgie au sud-est des Etats-Unis, qui est le leader mondial de la production. Selon les chiffres de l'USGS en 2004, le kaolin de Géorgie vendu ou utilisé dans l'industrie du papier comme charge minérale ou couchage, est estimée à environ 4.98 millions de tonnes. Dont environ de 2.04 millions de tonnes sont exportées.

Seuls quelques kaolins dans le monde peuvent être employés pour le couchage du papier en raison de conditions rigoureuses sur la viscosité et la blancheur.

Tableau II.5 Spécifications pour les produits standards de qualité "couchage" pour l'industrie de papier
(Elzea Kogel J. 2002)

Produit			Taille des particules (% <2μ)	Blancheur* (GE)	Viscosité Brookfield (cP)** (% solide/spinelle/ppm***)	Prix en moyenne (\$ /tonne)
Standard	Blancheur normale	#1 fine	95	86.0-87.5	300 (70/1/20)	75-85
		#1	90-94	86.5-88.8	300 (70/1/20)	75-85
		#2	80-82	85.5-87.0	300 (70/1/20)	60-70
		#3	73	85.0-86.5		
	Blancheur élevée	#1 fine	95	90-92	600 (70/2/20)	130-140
		#1	90-94	90-92	300 (70/1/20)	130-140
		#2	80-82	88-90	300 (70/1/20)	115-125
	Délaminé	fine	95	87-89	400 (67.5/3/20)	85-95
normal		80	88-90	400 (67.5/3/20)		
gros			84-89	400 (67.5/3/20)		
Calciné	Blancheur bas	86-92	80-83	500 (50/2/20)	280-320	
	Blancheur standard	86-92	Min. 92.5	500 (50/2/20)		
* Reflet mesuré à 457 nm. - ** Centi-poise - *** Révolution par minute						

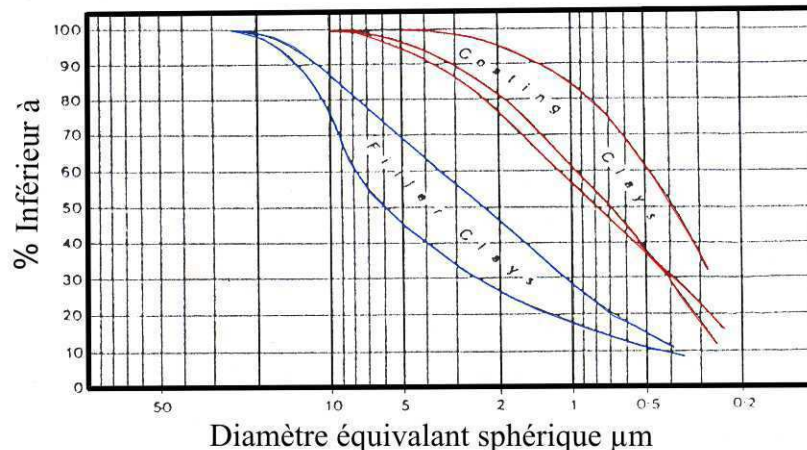
Tableau II.6 Spécification pour les kaolins de qualité "charge" pour l'industrie du papier

(Elzea Kogel J. 2002)

Produit		Taille des particules (% <2μ)	Blancheur* (GE)	Prix en moyenne (\$ /tonne)
Traitement sec	Standard	50-60	76-79	35-75
	Premium	50-60	79-83	
	Fine, blancheur standard	82-95	81-83	
	Fine, blancheur élevée	82-95	84-86	
Traitement en voie humide	Standard	60-70	82-84	
	Premium	60-65	83-85	

Le Tableau II.5 et le Tableau II.6 résument les spécifications des kaolins destinés à l'industrie du papier. La figure II.6 montre les limites de granulométrie pour l'utilisation du kaolin comme couchage et comme charge minérale dans le papier.

figure II.6 Limites des courbes de granulométrie pour les deux utilisations du kaolin dans le papier (Manning 1995)



II.4.2. Céramiques

Les argiles sont les matériaux plus consommés et aussi plus anciens dans l'industrie de la céramique. Les propriétés importantes du kaolin dans l'industrie céramique peuvent être présentées sous deux classes :

- les propriétés intrinsèques sont la composition minéralogique (compris analyse qualitative, dosage de phases minérales), la composition chimique et la distribution granulométrique (surface spécifique et CEC). Dans la composition chimique les facteurs suivant méritent d'être mentionnés ; éléments traces, soufre, carbone organique, chlore, de fluor, et sels solubles. La quantification de la composition minéralogique se fait par le calcul basé sur l'analyse chimique et la connaissance minéralogique qualitative.

- Le comportement au délitage, le refus sur tamis, la teneur en eau (l'humidité et la perte au feu), comportement à la défloculation, demande en floculant et la concentration critique, la courbe de défloculation, le comportement au coulage (test de filtration), la cohésion en cru, la plasticité le comportement au séchage et à la cuisson sont des propriétés technologiques intervenant lors de la mise en forme d'un produit céramique.

La densité, la porosité, le retrait, le module de rupture, la déformation pyroplastique, la blancheur, la coloration et le comportement dilatométrique sont les paramètres technologiques du comportement à la cuisson d'un produit céramique (Vouillemet 1998).

La mesure de tous ces paramètres pour chaque échantillon d'un gisement de kaolin, n'est pas possible. Une bonne connaissance de la relation entre la composition de l'argile (surtout la composition minéralogique) et ces propriétés est indispensable.

Les spécifications techniques recherchées pour la fabrication des céramiques fines sont les suivantes (fiche technique SIM, Argiles pour céramiques fines et réfractaires) :

- Teneur en kaolinite prédominante ;
- Eléments colorants non souhaités (argiles cuisant blanc) : $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 2 \%$, $\text{TiO}_2 < 2 \%$;
- La présence de quartz peut être souhaitable, sauf pour le réfractaire
- Présence de feldspaths, micas/illites et calcite à des teneurs $< 25 \%$, souhaitée pour les produits grésés (argile grésantes) ;

- Présence de smectites (teneur < 5 %), d'halloysite et de matière organique souhaitée (amélioration de la plasticité) ;
- Présence de gypse et de sels solubles prohibée.

En 1998, en France, sept sociétés produisaient annuellement environ sept millions de pièces de céramique sanitaire, dans quatorze usines réparties sur une partie du territoire. La fabrication de ces sept millions de pièces exige 180000 tonnes de matières premières et semi produit (chamottes) dont 54 kt d'argile et 28 kt de kaolin (Vouillemet 1998).

Il y a une volonté de développement sur ce marché, en élargissant la gamme de produits pour cette industrie. La teneur en alumine, la pureté chimique et la couleur à la cuisson, sont les atouts principaux des produits proposés par AGS. Pour les carreaux étirés, les chamottes sont largement utilisées sous formes brutes ou broyées. Malgré des réserves importantes, les argiles, de qualité adaptée, ne sont pas très fréquentes dans le bassin des Charentes (Delineau 1994).

II.4.3. Réfractaires

Les matériaux réfractaires sont utilisés dans les processus de production qui impliquent un contact avec des substances corrosives à haute température. Les matériaux réfractaires doivent être inertes avec les substances avec lesquels ils sont en contact, ils doivent être résistants mécaniquement et stables thermiquement ($T_{\text{fusion}} > 1500^{\circ}\text{C}$). Les principales utilisations de l'argile réfractaire concernent la fabrication de briques réfractaires, de chamottes (argile cuite utilisée comme « dégraissant dans les produits céramiques) et de divers ustensiles accessoires, tels que des creusets, les nacelles, cornues, et pot de verrerie, utilisés dans les industries métallurgies (Columbia Encyclopedia).

Les paramètres qui jouent des rôles importants sur les propriétés des produits réfractaires sont les suivantes :

II.4.3.1. Composition chimique et minéralogique

(a) Quartz

La transformation réversible quartz- β et quartz- α à 573°C s'accompagne d'une variation volumique qui peut être à l'origine d'un abaissement des propriétés mécaniques des matériaux frittés. Par contre, la transition de cristobalite- β à cristobalite- α s'avère moins dommageable pour les produits frittés.

(b) Perte au feu

Les argiles kaoliniques ont une perte au feu élevée qui est due à l'élimination de l'eau de constitution, à la décomposition de certains minéraux associés tels les carbonates et la combustion des matières organiques.

La composition chimique d'une kaolinite correspondant à la formule structurale théorique $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ est la suivante:

$\text{SiO}_2 = 46.5\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 39.5\%$; $\text{H}_2\text{O} = 14.0\%$.

Le carbone et le soufre sont les impuretés communes et devraient normalement être inférieures 1.5% et 0.1% respectivement. (BGS Factsheets ; Fireclay 2005)

(c) Les minéraux du fer

Selon Singer (1963), une faible teneur de fer peut baisser le point de fusion 20 à 30°C . Soro (2003) a étudié les changements des composés ferriques des kaolins lors du processus de cuisson. Les ions de fer favorisent la cristallisation, dans un premier temps, d'une phase de structure spinelle et dans un second temps, de mullite primaire, permettant même de convertir 50% du métakaolin en mullite dès 1150°C . Ils

abaissent la température de mullitisation (mullite secondaire) des micro-domaines riches en silice et celle de formation de cristobalite.

Castelein (2000) note que les impuretés peuvent avoir une influence significative sur les transformations des phases. Une étude par spectroscopie Mössbauer lui a permis de caractériser l'évolution de l'environnement chimique et structural du fer en fonction de la température (voir aussi, Milheiro et al. 2005).

La couleur de cuisson est le critère principal sur lequel est jugée la convenance d'une argile pour la fabrication de réfractaire

(d) Alcalis

La présence d'alcalis d'une teneur supérieure 1-2% cause des sérieux problèmes de vitrification et de retrait du produit (Singer, 1963). Avec l'augmentation de la température, il y a augmentation de la quantité de phase vitreuse et diminution de sa viscosité et les pores ont tendance à se fermer progressivement. Dans le même temps, sous l'effet de la température élevée, les gaz piégés se dilatent et font gonfler le matériau. On arrive ainsi au point d'inversion de la courbe dilatation-retrait qui par conséquent, n'est pas caractérisée par le minimum de la porosité.

On comprend facilement que la résistance mécanique la plus élevée correspond au développement maximal de la phase cristalline et au développement optimal de la phase vitreuse. Cela veut dire une quantité suffisante de phase vitreuse qui permet une bonne cimentation des grains cristallins.

La gamme de produits d'AGS comprend des chamottes brutes et broyées, dont la teneur en alumine varie de 38 à 47 %, ainsi qu'une vaste gamme d'argiles déchetées et broyées séchées. Les chamottes sont utilisées en céramique pour le dégraissage.

II.4.4. Matériaux de construction

La majorité des gisements d'argile se composent de mélange d'argiles et de minéraux non-argileux. Une telle argile généralement n'est pas vendue à l'état brut, mais elle est employée par les producteurs principalement dans l'industrie du bâtiment ou dans la fabrication de ciment (Gillott 1987).

Les argiles calcinées à basse température, ou métakaolin, présentent des caractéristiques pouzzolaniques très élevées, qui en font d'excellents additifs pour les mortiers et bétons à base de ciment Portland (He et al 1994, Bich 2005).

Le kaolin, en tant que source d'alumine, permet d'éviter la présence de fer pour la production de ciment blanc. Il est alors nécessaire de combler le déficit en silice par l'adjonction de sables siliceux.

AGS dispose de capacités de production importantes pour ces produits, commercialisés sous le nom de gamme : ARGICAL.

Ces métakaolins intéressent particulièrement les utilisateurs de ciments blancs, ainsi que les fabricants de mortiers et de bétons techniques. Ces métakaolins peuvent être vendus à l'industrie du caoutchouc (Sonnier 2006).

Selon AGS, les propriétés obtenues sur les produits finis sont :

- Elimination des efflorescences primaires et secondaires,
- Réduction de porosité,
- Amélioration des résistances mécaniques,
- Meilleure résistance aux agressions chimiques,
- Meilleur aspect de surface et de couleurs

II.4.5. Les applications médicales et cosmétiques

Le kaolin a une longue tradition d'utilisation dans des applications médicales et cosmétiques. Ces marchés exigent les niveaux les plus élevés de pureté et des spécifications de produit qui, naturellement, ont un coût ([Canning 2006](#)).

II.4.5.1. Kaolin de Pharmacie : une histoire

Le kaolin a été employé dans le domaine médical (pharmaceutique et vétérinaire) et les cosmétiques depuis longtemps. Il semble que les propriétés médicinales du kaolin soient connues depuis plus de 1.000 ans.

« Muhammad Zakariya Razi », connu sous le nom de Razes ou Rhazes (ca 850-823), indique une histoire intéressante sur la façon dont il a guéri un individu saisi par une affection cholérique très grave (Le choléra est une maladie contagieuse épidémique due à un agent bactérien : le *Vibrio cholerae*. Le premier symptôme est l'apparition d'une diarrhée et, en l'absence de traitement, l'issue est souvent fatale. Au début du XXe siècle, le choléra était encore l'une des maladies épidémiques les plus virulentes du monde occidental et il représente encore aujourd'hui un grave problème en Asie) accentuée par de violents vomissements et des crampes,... il a administré de l'argile venant de Nishapur (maintenant Neyshabur) près de Mashad en Iran et la nausée et l'indigestion ont été immédiatement soulagées. Les doses utilisées sont équivalentes à 117g à la fois ([Canning 2006](#)).

II.4.5.2. Utilisations modernes pharmaceutiques

Dans le secteur pharmaceutique, le kaolin est employé comme diluant et complément dans des médicaments et cataplasmes, comme par exemple en mélange avec de la morphine. Les propriétés absorbantes du kaolin peuvent réduire le taux auquel un médicament est libéré dans le corps et même la quantité réelle absorbée par le corps. La quantité de kaolin change considérablement selon les applications, entre 7.5% et 55% de kaolin dans des applications absorbantes, autour 25% dans des poudres de saupoudrage, et jusqu'à 55% dans les cataplasmes.

II.4.5.3. Produits de beauté

L'utilisation principale pour le kaolin en produits de beauté est le fond de teint. Les fonds de teint sont un mélange de la poudre teintée et parfumée employée pour améliorer l'aspect de peau. La quantité du kaolin dans un fond de teint peut changer seulement de 3% dans une poudre lâche à 10% dans un gâteau, serré, ou la formulation lourde. Le kaolin est concurrencé par le carbonate de calcium précipité (PCC) comme remplisseur en produits de beauté, mais le kaolin est encore considéré comme de loin supérieur dans cette application. Le kaolin est utilisé dans la formulation de rouge à lèvres.

II.4.5.4. Spécifications des kaolins de pharmacopée

Le kaolin peut contenir des micro-organismes ; pour cette raison, le kaolin utilisé dans ces applications est stérilisé. Cette stérilisation est habituellement effectuée par le fabricant plutôt que le producteur de kaolin ([Canning 2006](#)).

On s'assure par ailleurs de faibles taux en métaux lourds tels que Pb, As ou Cd. Le kaolin est séché à l'humidité de 10% et stocké dans un compartiment adapté habituellement d'environ 200 tonnes. Une fois approuvé par le laboratoire de contrôle de qualité, le kaolin est transféré à un silo équipé d'un moulin d'attrition à gaz. Ceci ramène le kaolin à l'état de poudre homogénéisée fine et ramène simultanément l'humidité moins de 1.5%.

II.4.6. Charges

La kaolinite est hydrophile, et elle se disperse aisément dans l'eau avec l'addition d'un peu de dispersant chimique pour inverser la charge des bordures dues aux liens cassés. Par conséquent, des

kaolins sont employés intensivement dans les peintures à base d'eau et les formulations de couchage de papier. La dispersion des particules de kaolin dans un système à base d'eau est essentielle afin de donner des propriétés d'imprimabilité, de douceur et d'opacité à une feuille de papier ([Murray, 1999](#)).

II.4.6.1. Peintures

Le kaolin est utilisé en peinture en raison de son inertie chimique, de son opacité et de son pouvoir suspensif qui permet d'améliorer les propriétés d'écoulement et de thixotropie. Il intervient souvent comme adjuvant des pigments blancs du dioxyde de titane, pour abaisser les coûts. La granulométrie joue sur le type de peinture, le kaolin grossier est utilisé pour produire les peintures mates, et les kaolins fins sont utilisés pour fabriquer les peintures brillantes.

Les spécifications sont régies en France par la norme NF T31.101 (juin 1987), NF EN ISO 3262-8 (Décembre 1999) est la norme pour le kaolin naturel et NF EN ISO 3262-9 (Octobre 1998) est pour le kaolin calciné utilisé comme matières de charge pour peintures.

II.4.6.2. Caoutchoucs

Le kaolin améliore la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion et la rigidité des produits. Les spécifications sont précisées dans la norme NF T45008 d'octobre 1986.

L'étude d'[Yvon et al \(1980\)](#) montre que la qualité cristalochimique de la charge influence fortement la qualité des caoutchoucs chargés. Ils mentionnent de très bonnes corrélations entre le pH et tous les paramètres d'utilisation : plus le pH est élevé, meilleures sont les propriétés mécaniques des caoutchoucs chargés.

Dans cette industrie, on parle de kaolin dur (75 à 80 % $< 2\mu\text{m}$) qui tend à augmenter la résistance à la traction au déchirement et à l'abrasion. Le kaolin mou (20 à 45 % $< 2\mu\text{m}$) diminue l'élasticité, mais accroît sa stabilité dimensionnelle et améliore l'état de surfaces des extrudés ([fiche technique de la SIM, Nov.1998 112-115](#)).

La consommation de kaolin dans le caoutchouc est autour de 1.3 Mt par an. En 1976, On a utilisé en moyenne 129 kg pour produire chaque tonne de caoutchouc. Ce taux d'utilisation a diminué à 76 Kg/t en 1993, mais l'augmentation de la production du caoutchouc maintient le marché du kaolin dans ce secteur ([Roskil, Kaolin, 1993](#)).

II.4.6.3. Plastiques et polymères

L'utilisation du kaolin dans la plastique permet d'obtenir des surfaces plus lisses, une meilleure stabilité dimensionnelle et une meilleure résistance aux acides.

Dans la fabrication de PVC, le kaolin agit comme agent de renforcement car il augmente la durabilité du plastique.

[Liu et al. \(2005\)](#) ont travaillé sur l'utilisation du kaolin organo-modifié dans le polypropylène. Les résultats indiquent que du kaolin organo-modifié peut être exfolié dans le polypropylène, ceci semble confirmé par l'absence du pic 001 sur le modèle de XRD et l'apparition des feuilles individuels sur des photos de microscopie électronique en transmission (TEM).

L'utilisation du kaolin organo-modifié dans les polymères permet d'obtenir des propriétés renforcées pour des taux de charge beaucoup faibles.

Le remplacement d'une partie de la charge des polymères par des nano kaolin peut améliorer la propriété des retardateurs de flamme ([Chang et al 2007](#))

II.4.7. Autres applications

II.4.7.1. Zéolite synthétique

La kaolinite entre dans la production de zéolites synthétiques avec des hydroxydes de Na, de Ca, de Mg et de K. Le traitement à $\sim 100^{\circ}\text{C}$ convertira la kaolinite en structures de zéolite avec différentes tailles de pore.

II.4.7.2. Production de SiC et Alumine

Des études récentes ont prouvé que la kaolinite peut être exploitée comme source d'alumine, puisque la réduction carbothermique d'argiles kaoliniques à $1360\text{-}1505^{\circ}\text{C}$ produit séparément de l' Al_2O_3 récupérable et du SiC (Brayant et al. 1980).

II.4.7.3. Fibres de verre

Le remplacement des feldspaths par du kaolin permet d'obtenir des verres à faible teneur d'alcalins, présentant d'excellentes caractéristiques mécaniques.

II.4.7.4. Elevage des animaux

Le kaolin est ajouté aux aliments des porcs, comme supplément, est pour la prévention des maladies diarrhéiques (Trckova et al. 2004). L'étude de Sibbald et al (1960) en ajoutant du mélange cellulose-kaolin aux aliments des poussins, montre un rapport linéaire entre la concentration d'ajout et les gains de poids des poussins. Prola et al. (2006) sont arrivés aux résultats similaires sur l'alimentation des chats. La recherche en Islande a indiqué que l'introduction du kaolin augmente la turbidité de l'eau, les poissons deviennent plus actifs et s'alimentent plus fréquemment (Canning 2006).

II.4.7.5. Répulsif d'insectes

Les citronniers, les pêchers, et les oliviers peuvent être traités avec un mélange du kaolin (2-5%) et de l'eau pour les protéger contre quelques insectes endommageant leur fruit dans l'agriculture biologique et l'affermage conventionnel.

Le kaolin entre dans la composition de nombreux autres produits, mais en très faible quantité ; additifs de nourriture, encres, adhésifs, agent catalyseurs, agents blanchissants (polisseurs), absorbants, produits phytosanitaires, textiles, revêtement de sol, fonderie.

II.5. Production du kaolin et les enjeux miniers et industriels

II.5.1. Introduction

Les dépôts de Géorgie aux Etats-Unis contiennent de 90 à de 95% de kaolinite. On rapporte que différents niveaux crétacés ont jusqu'à 12 m d'épaisseur et s'étendent plus de 2 km. tandis que l'épaisseur des séquences tertiaires atteint de 10 à 25 m et une longueur qui peu atteindre jusqu'à 18 km.

Le dépôt de Weipa en Australie a de 8 à 12 m d'épaisseur et contient de 40 à de 70 % de kaolinite. On rapporte que le dépôt de Jari au Brésil contient plus de 250 Mt de kaolin de bonne qualité (catégorie commerciale), et plus de 200 Mt de réserves prouvées dans le gisement de Capim (Brésil).

Les gisements de Ball Clay du Tennessee et du Kentucky se composent de kaolin avec de 5 à de 30 % de silice. Les différents dépôts ont plus de 9 m d'épaisseur et une longueur de 100 à 800m pour une largeur allant jusqu'à 300 m.

La décision d'exploiter un gisement particulier de kaolin pour une utilisation spécifique dans l'industrie du papier, de la fibre de verre, de la céramique, ou autre, dépend de facteurs très divers, tels que la qualité brute de l'argile (in situ), la qualité du traitement, le coût du traitement, les possibilités de traitement et les coûts de transport. Dans la plupart des cas la décision dépend premièrement de la qualité de la matière première. La qualité du kaolin est contrôlée par sa composition minéralogie. On détermine l'aptitude à être utilisée dans une industrie précise en réalisant une série d'essais sur des échantillons (des carottes) (Elzea Kogel J. 2002).

La concurrence économique sur le marché du kaolin, exige une diversification des produits, ce qui nécessite la prospection et l'exploration de nouveaux gisements, une exploitation intelligente, et un savoir faire de gestion des réserves, et la connaissance du processus de la production pour augmenter le rendement.

II.5.2. Prospection et exploration du kaolin

On présente ici les méthodes de prospection de gisements d'argiles d'un point de vue très général. Le processus du sondage et l'acquisition des données dans les gisements charentais seront expliqués dans le deuxième chapitre.

Les secteurs à hauts potentiels sont choisis sur les critères géologiques. Selon le type de gisement (primaire ou secondaire), différents critères et diverses méthodes peuvent être utilisés. La localisation des exploitations actives, les zones d'exploitations anciennes les forages historiques, la géographie et la topographie sont considérés comme les guides pour la prospection.

Pour les gisements primaires, les zone plus altérées sont plus intéressantes, et donc la fracturation de la roche mère et la circulation des eaux météorites et hydrothermales définissent la forme et la qualité du gisement. Vu la présence de différences significatives entre les propriétés physiques et chimiques de la roche mère et de la zone altérée certaines méthodes géophysiques peuvent rendre service. Grâce à l'industrie de pétrole, on constate le développement vertigineux de ces méthodes. Un des facteurs qui limite leurs utilisations dans l'industrie minière est leurs coûts élevés.

La spectrométrie aéroportée de rayons gamma a été employée pour définir des cibles potentielles de kaolin dans le massif armoricain en Bretagne, (France). Cette méthode d'exploration est basée sur le principe que la kaolinite est constituée par l'hydrolyse de feldspaths potassiques avec élimination du potassium. Par conséquent, le contraste de la présence du potassium dans une roche favorable telle qu'un leuco-granite est probablement un marqueur significatif de l'occurrence de kaolin. En appliquant cette méthode au massif armoricain tout entier, il a été possible d'identifier 150 zones pauvres en potassium,

dont 115 qui ont été soumises à un contrôle rapide et 36 qui ont contenu du kaolin (21 nouvelles découvertes). Cette méthode, est sûre pour l'environnement et facile à employer, c'est donc un bon outil pour définir rapidement des cibles potentielles de kaolin à l'échelle régionale ([Tourliere B. et al. 2003](#)).

Les méthodes sismiques sont utilisées pour définir la géométrie du gisement et la variation de l'altération à l'intérieur du gisement.

Pour les gisements secondaires, sédimentaires, la connaissance stratigraphique est la clé la plus importante pour la prospection des nouveaux gisements.

La méthode de sismique réflexion à haute résolution a été utilisée par [Hundret et al. \(2006\)](#) pour interpréter le profil des sondages et trouver les sites de discordances de la formation Chaswood au Sud de la Nouvelle Ecosse.

Une des méthodes récemment très utilisées pour connaître les structures du sous-sol à faible profondeur est celui du relevé radar (GPR). Des ondes électromagnétiques sont envoyées dans le sous-sol. Lorsque ces ondes rencontrent des changements de milieux, une partie est renvoyée vers la surface et enregistrée par le GPR. Plus la fréquence est élevée, plus la précision est grande, mais plus le signal est atténué par la profondeur atteinte. La gamme de fréquence va de quelques MHz à quelques GHz. La pénétration optimale en profondeur est réalisée sur les sols arénacés secs ou matériaux secs massifs tels que le granite, le calcaire, et le béton où la profondeur de pénétration va jusqu'à 15m. Dans les sols (ou les argiles) humides et les sols avec une conductivité électrique élevée, la pénétration est parfois très limitée. [Beauvaisa et al. \(2004\)](#) ont utilisés une combinaison de la tomographie électrique de résistivité (ERT) et les GPR pour étudier des étapes des systèmes latéritiques développés sur les roches cristallines du sous-sol au Sénégal oriental.

Il reste que les gisements de kaolin sont localisés normalement par forage. Dans le cas des gisements sédimentaires, la vitesse d'outil de forage dans les sédiments non-consolidés et les lentilles argileuses est assez grande, Ce qui réduit les coûts de sondage, et par conséquent privilégie la méthode du sondage carotté comme l'outil de base de la prospection et l'exploration du gisement.

Une fois qu'un dépôt a été découvert, sa qualité et sa taille sont déterminées en examinant des carottes acquises selon une maille de sondage régulière. Le maillage des sondages est une fonction de la dimension du gisement, de la variabilité des propriétés physico-chimique à l'intérieur du gisement, du stade d'évaluation et du niveau de précision des informations souhaité.

Au moins 62 trous pour 100 ha (25 trous par 100 acres) offrent une indication de la taille et de la qualité du dépôt pour les gisements de la Géorgie, où il n'est pas rare de forer 60 m (200 pieds) au-dessous de la surface à un coût de forage et d'essai de 1.500 \$ à 2.000 \$ par carotte. Le forage espacé plus étroitement, habituellement sur une maille de 30 à 60 m, est nécessaire pour une analyse plus détaillée de réserve. Il est entrepris seulement si le forage plus espacé indique que la qualité et la taille du dépôt est suffisante pour justifier l'étude plus détaillée ([Elzea Kogel J. 2002](#)). Le maillage des sondages pour évaluation de réserve des gisements kaoliniques des Charentes se situerait vers 20-25 m (cf. V.3.2).

La taille minimale du gisement exploitable varie avec la qualité du kaolin, les facteurs d'exploitation, et les paramètres du traitement, [Berton Y. et Le Berre \(1983\)](#) ont cité de l'ordre de 3 millions de tonnes de matière brute estimée à proximité de l'usine de traitement (~600 000 tonnes de kaolin). La quantité du kaolin de qualité commerciale d'une mine s'étend de 50000 à plus de 400000 tonnes brutes humides selon l'épaisseur du corps de minerai et la taille de la coupe. La plupart des compagnies sont actionnaire à plus d'une mine, ce qui augmente leurs options du mélange, permettant l'optimisation de l'utilisation des ressources, l'amélioration et le contrôle de la qualité, et augmente la capacité des usines de traitement ([Elzea Kogel J. 2002](#)).

D'autres considérations qui doivent être prises en compte, avant de décider de se lancer dans une exploitation, sont les suivantes :

- (1) les taux de recouvrement (l'épaisseur de la couverture à l'épaisseur de kaolin) ;
- (2) la distance à l'usine du traitement, (la distance de la station dessablage la plus proche et de canalisation ou à l'installation du traitement) ;
- (3) tous les marécages voisins, et les terres inondables ;
- (4) le statut de bail ou de propriété de terre ; et
- (5) le potentiel pour des problèmes d'eaux souterraines.

Après la prise de la décision d'exploitation, un plan détaillé de la mine (carrière) est développé et approuvé. La terre est dégagée et le décapage de recouvrement commence. Dans certains cas, le recouvrement peut être de plus de 30 m d'épaisseur (50 m dans le gisement BDR). Les terrains de recouvrement, historiquement, ont été plus minces, mais la majeure partie du kaolin de haute qualité avec peu de recouvrement a été déjà extraite. Pour cette raison, on constate une tendance vers les dépôts plus profonds, mais on est de plus en plus exposé au problème des eaux souterraines.

Une fois que la surface de kaolin est découverte, l'argile est excavée à l'aide des pelles rétro-caveuses, racloirs (dans les grands gisements du Géorgie), et de temps en temps, des draglines. Les pelles mécaniques sont les plus utilisées dans l'exploitation des gisements charentais.

L'argile est souvent exploitée banc par banc, parce que la qualité d'argile change verticalement et horizontalement, l'exploitation sélective est employée pour séparer des kaolins de qualité différente dans des réserves. Le mélange contrôlé de ces kaolins stockés est employé pour réaliser la qualité désirée de matière première avant le traitement ou la vente.

Les blocs individuels de mine, ou des coupes des gisements Georgiens, typiquement ont une gamme de taille de 16 à 80 m (40 à 200 acres) et l'épaisseur de 0.6 à 4 m (2 à 12 pieds).

La campagne du sondage s'effectue normalement sur une maille régulière (Tableau II.7), le carottier double est utilisé pour extraire des échantillons, la distance entre les sondages dépend de l'étape de l'exploration et la précision souhaitée de l'évaluation du gisement. Le tableau suivant propose une maille de sondage approximative pour chaque étape.

Tableau II.7 Distance entre les sondages pour chaque étape

But de l'étude	Facteur de sécurité (%)	Distance (m)
Prospection préliminaire		120
Mise en évidence de la réserve	20	60
Planning de la carrière et développement	10	30
Control de qualité et le calcul précis de volume et le tonnage de chaque classe de réserve		15

Le projet de prospection du bassin des Charentes comporte 6 profils de sondages espacés de 2 à 3 km, sur lesquels un sondage carotté est effectué chaque 500 m. Ces sondages sont utilisés pour le suivi de l'évolution des séquences sédimentaires, la forme du substrat calcaire et la définition des cibles d'exploration par les sondages plus serrés. La prospection et l'acquisitions des données chez AGS sont expliquées en détail dans le deuxième chapitre.

La définition de la taille minimale du gisement exploitable doit prendre en compte la qualité de l'argile, le taux de recouvrement, la distance de l'usine et proximité de route et etc. Un gisement de 50 Kt à faible taux de couverture peut être considéré comme une cible, en supposant une densité de 1.7 t/m^3 et une puissance moyenne de 3 m, la surface de la cible arrive à $10\,000 \text{ m}^2$. Le Tableau II.8 montre la probabilité d'avoir au minimum un sondage d'une maille régulière continue, dans une cible circulaire

(pour avoir le détail voir ; Marechal et Matheron 1969, Singer et Wickman 1969, Sinclair 1975, McCammon 1977). La profondeur des sondages varie en fonction de la profondeur du socle carbonaté et le but du sondage. Pour les sondages de prospection l'idée est d'intercepter la totalité des séries fluviales, mais dans le cas des sondages réalisés pour définir la limite du gisement ou les sondages d'évaluation de la qualité du kaolin, on profite de la connaissance acquise des sondages des étapes antérieures. Ces sondages seront arrêtés à une profondeur assurant de ne pas perdre des informations sur les couches de kaolin industriel. Chaque opération de forage avec les matériels qui sont en possession d'AGS coûte environ 45 €/m, et les frais d'analyses sont évalués à presque 100 € par échantillon.

Tableau II.8 Probabilité d'intercepter d'une cible circulaire par les sondages d'une maille régulière continue

Cible	Masse (Kt)	50	75	100	250	500	1000
	Volume (m ³)	29 412	44 118	58 824	147 059	294 118	588 235
	Rayon (m)	55.9	68.4	79.0	124.9	176.7	249.8
Taille de la maille de sondage (m)	100	90.03	99.75	100.00	100.00	100.00	100.00
	120	68.09	91.79	99.03	100.00	100.00	100.00
	150	43.73	65.41	84.75	100.00	100.00	100.00
	200	24.49	36.97	49.05	97.15	100.00	100.00
	250	15.65	23.61	31.33	78.17	99.99	100.00
	300	10.93	16.33	21.85	54.49	93.99	100.00
	400	6.09	9.25	12.25	30.61	61.33	97.15
	500	3.85	5.93	7.77	19.41	39.09	78.17
	600	2.77	4.21	5.53	13.61	27.33	54.49
	750	1.77	2.61	3.49	8.77	17.49	35.05
	1000	0.97	1.45	1.93	4.89	9.73	19.41
	1200	0.69	1.01	1.37	3.41	6.73	13.61
	1500	0.45	0.69	0.89	2.21	4.37	8.77
	2000	0.21	0.37	0.45	1.21	2.41	4.89
	2500	0.13	0.21	0.29	0.69	1.49	3.05
	3000	0.09	0.21	0.21	0.57	1.09	2.21
	4000	0.05	0.09	0.09	0.29	0.61	1.21
	5000	0.05	0.05	0.09	0.21	0.37	0.69
	7500	0.01	0.01	0.05	0.09	0.21	0.37
	10000	0.01	0.01	0.01	0.05	0.09	0.21

L'épaisseur moyenne : 3m et la densité 1.7

Comme on le constate, avec une maille régulière de 500m, on a très peu de chance de trouver un gisement de kaolin de petite taille, cette chance est inférieure à 3.85% pour une cible aussi grande qu'un gisement exploitable (50 Kt).

La probabilité d'avoir au moins deux sondages voisins interceptant la cible diminue très rapidement. Pour un gisement de 50 Kt, On constate une probabilité très faible, même avec une maille de 100m (Tableau II.9).

La méthode des sections parallèles était la méthode classique utilisée pour évaluer le tonnage des différentes catégories d'argile en Charentes. L'utilisation des outils géostatistiques fait appel à une connaissance de la variabilité spatiale des éléments chimiques et l'adaptation de la méthode d'échantillonnage qui est le sujet principal de cette thèse.

Tableau II.9 Probabilité d'intercepter d'une cible circulaire par au moins d'un sondage d'une maille régulière continue

Cible	Masse (Kt)	50	75	100	250	500	1000
	Volume (m ³)	29 412	44 118	58 824	147 059	294 118	588 235
	Rayon (m)	55.9	68.4	79.0	124.9	176.7	249.8
Taille de la maille de sondage (m)	100	7.74	47.30	80.11	100.00	100.00	100.00
	120	0.00	10.42	37.18	100.00	100.00	100.00
	150	0.00	0.00	2.42	87.99	100.00	100.00
	200	0.00	0.00	0.00	25.58	94.35	100.00
	250	0.00	0.00	0.00	0.00	56.78	99.99
	300	0.00	0.00	0.00	0.00	14.94	87.99
	400	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.58
	500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

L'épaisseur moyenne : 3m et la densité 1.7

II.5.3. Exploitation ou extraction du kaolin

Dans la plus part des cas le kaolin ne subit pas de traitements très compliqués. Les exploitants s'appuient donc sur les propriétés intrinsèques de ces minéraux dans le gisement, c'est pourquoi pour le producteur d'argile, la sélection optimale des qualités en carrières devient très importante. La gestion des réserves et le respect des spécifications commerciales nécessitent une bonne connaissance des réserves, d'autrement dit, la variabilité des substances (les éléments critères) en place doit être bien étudiée et bien maîtrisée. D'autre part les minéraux industriels ont des usages très variés ce qui impose d'une connaissance des différentes propriétés physico-chimiques. La maîtrise de l'utilisation de ces minéraux passe par la connaissance et la compréhension de ces propriétés. Le coût très élevé du traitement nécessaire pour améliorer certaines propriétés, et le prix de vente relativement bas de ces matériaux, sont également des éléments importants qui militent en faveur d'une bonne connaissance des caractéristiques intrinsèques des gisements.

La plus grande partie de la production de Kaolin provient de carrières à ciel ouvert. Les couches d'argile réfractaire de bonne qualité de plus de 2 mètres d'épaisseur sont extraites parfois par des méthodes souterraines (Hora 1998). Dans le cas de présence d'une couverture très épaisse (plus de 35m) utilisation d'excavateurs (Rotary excavator) peut être justifiable (Berezhnoy 1961).

II.5.3.1. Production de kaolin dans le sud-ouest de l'Angleterre

La kaolinite (ou le kaolin), a été découverte la première fois en Cornouaille en 1746 par William Cookworthy. Il a construit une usine de porcelaine près de Plymouth et a fait breveter l'utilisation des kaolins cornouaillais en 1768. Des dépôts semblables ont été trouvés sur le bord méridional du Dartmoor dans le Devon à la fin du 19ème siècle. Aujourd'hui, l'exploitation est réalisée pas trois compagnies (Goonvean, Imerys, et WBB) exploitant approximativement 12 carrières et produisant plus de 2 Mt de kaolin raffiné par an. Ce matériel est vendu pour le papier, la céramique, la peinture et les industries pharmaceutiques, entre autres.

Les gisements de kaolins primaires de l'Angleterre du Sud-ouest incluent un certain nombre de types de granites tels que du granite à biotite, du granite à tourmaline, du granite à mica de lithinifère, et du granit à topaze.

Goonvean possède des exploitations sur chaque type de granite, ce qui permet le mélange des différents produits. Au début, les sols supérieurs ou les terrains de recouvrement, entre 3 et 6 m d'épaisseur sont enlevés mécaniquement. La masse kaolinisée, connue sous le nom de STOP, est lavée hydrauliquement en utilisant le monitor, un canon à eau sous pressions jusqu'à 20 atmosphères et à 6000

litres par minute. C'est assez pour désagréger le granite kaolinitisé et pour produire une suspension des particules fines dont la kaolinite et le sable fin (le quartz, le feldspath inaltéré et le mica). L'ensemble est stocké en bassin. La suspension est pompée à l'usine pour séparer la kaolinite de sable par hydrocyclones et centrifugeuses. La taille des particules de la surverse de cyclonage est inférieure à 15 microns, alors que la centrifugeuse fait une autre à séparation à moins de 5 microns. La concentration en solide de boue est à ce stade entre 3% à 5%. Elle est augmentée jusqu'à environ à 25% dans des épaisseurs. C'est alors un filtre-pressé qui donne un gâteau d'une humidité en général de 10%. Des kaolins en poudre sont produits par les pulvérisateurs (sécheurs atomiseurs). La livraison au client peut être en vrac ou en sacs ; grands sacs en IBC (les sacs en propylène) d'une tonne ; sacs de 50 kg ou de 25 kg ; ou sous la forme en poudre dans des sacs en IBC de 25 kg. (Canning 2006)

II.5.3.2. Production de kaolin dans le bassin des Charentes

Dans les gisements kaoliniques secondaires du bassin des Charentes, les niveaux exploités sont épais de 3 à 8 m, suivant le site, la découverte pouvant atteindre 30 à 40 m de puissance. Dans le gisement de Bois des Rentes, l'épaisseur de l'argile surtout dans le Sud-ouest du gisement est très élevée.

Le taux de recouvrement (exprimé en mètre cube de couverture par tonne de kaolin) varie d'un gisement à l'autre. Il peut être très faible aux alentours de 1 m³/t, comme dans la carrière de Chierzac. Dans le cas du gisement de Bois des Rentes il atteint à 5.5-6 m³/t (voir figure II.7). Un taux en moyenne de 3.5 m³/t est acceptable pour les gisements des Charentes.

L'opération de décapage et de découverte se fait par une compagnie tiers, le coût de l'opération est évalué autour de 1.35 à 1.50 €/m³.

L'extraction de l'argile est faite par des pelles mécaniques (pelle mécanique de petite taille figure II.8.a). A Grand Pas, à cause de la résistance mécanique très élevée de certain type d'argile (argile pierreuse), la pelle mécanique utilisée dans le gisement est plus puissante et plus grande (figure II.8.c). La puissance plus importante de l'argile permet d'exploiter le dépôt sur une plus grande épaisseur. La figure II.8.b montre l'exploitation du kaolin dans le gisement de Chez Maudet.



figure II.7 Opération de découverte du sable dans la carrière de Bois des Rentes (BDR), le taux de recouvrement est 5.5 m³/t d'argile

La zone d'exploitation est choisie à partir des données de sondages. Les dimensions et la direction de celle-ci sont définies par le chef de carrière en regardant des données de sondages et la géométrie de l'argile. Dans les zones très profondes et en forme de puits, un système d'extraction avec une pelle

mécanique spéciale a été utilisé Les traitements réalisés par voie sèche dans les différents unités de production ne transforment pas fondamentalement les argiles kaoliniques. Si l'on excepte l'épuration par sélection pneumatique effectuée dans l'unité de fabrication des charges minérales, l'obtention des spécifications requises repose sur la gestion du contenu des gisements et l'application de méthodes d'exploitation sélectives.



Chaque classe des réserves d'argile est exploitée et stockée dans un tas séparé à proximité de chaque carrière. Le premier critère est la teneur en alumine mesuré sur les échantillons cuits. PF désigne la perte au feu qui est la perte de masse d'un échantillon entre 110 °C et 1100 °C. La PF représente la masse des hydroxydes, des matières organiques et d'autre composant volatiles.

La composition chimique des échantillons de kaolin est mesurée sur le kaolin calciné (on l'appelle ici, la teneur calcinée ou la teneur mesurée). La teneur brute sur l'échantillon sec est facile à calculer en ayant la teneur calcinée et la perte au feu (teneur brute = teneur calcinée*(100-PF)/100). La teneur mesurée n'est pas additionnable pour les réserves in situ, car dans le gisement la perte au feu est comprise dans la masse ou volume des échantillons ou des blocs. Les teneurs mesurées sur les échantillons cuits ne sont pas additionnables. L'estimation de ces variables pose un problème qui est abordé au paragraphe V.2.1.

La présence d'oxydes de fer et de titane n'est pas appréciée, les limites sont exprimées sur les échantillons cuits.

Dans les différentes carrières ouvertes dans le bassin des Charentes, les argiles sont extraites par gradins dont le dimensionnement est établi sur la base des résultats de l'évaluation et sont acheminées vers les aires de stockage et/ou de mélange proches des unités de fabrication.

L'encadrement précis des spécifications requises pour chaque débouché et l'assurance d'une constance de qualité nécessite des opérations de mélange et d'homogénéisation entre les différentes matières premières identifiées. Les argiles sont ensuite soumises aux traitements thermiques et/ou mécaniques nécessaires à l'obtention des produits finis (Négroni 2003).

II.5.4. Traitement du kaolin et la préparation industrielle

Avec une part de plus de 50% du marché industriel du pigment blanc, le kaolin traité est la charge minérale la plus utilisée (en comparaison avec le carbonate de calcium 30 % et moins de 10 % pour le talc et pour le titane). En comparaison avec d'autres minéraux concurrents le kaolin possède les avantages suivants :

- Disponibilité en tant que particules naturelles de taille micronique ;
- Chimiquement inerte et résistance au jaunissement ;
- Particules tendre avec une abrasivité très faible, et par conséquent, une usure moins importante des équipements ;
- Éclat et blancheur relativement bons, réflectivité élevée ;
- Particules de forme plates à haut rapport diamètre des particules sur épaisseur (aspect-ratio).
- Capacité de faire une pâte à haute concentration de solide pour le traitement en voie humide peu coûteux ;
- Possibilité de traitement par voie sèche (air-float kaolin) ou par voie humide (water-wash kaolin).

Alors que les sources locales peuvent se concurrencer pour les marchés de basse valeur, les produits de qualité dont le traitement peut être coûteux, peuvent être diffusés sur plusieurs milliers de kilomètres (Hora 1998).

II.5.4.1. Traitement par voie sèche :

Les méthodes de traitement par voie sèche du kaolin sont limitées dans leur capacité d'améliorer l'éclat ou la viscosité de l'argile.

Le traitement se compose seulement du déchiquetage, du séchage, du broyage et de la séparation des impuretés (de gros grain) de l'argile brute, en les passant dans les colonnes d'air. Le kaolin traité par voie sèche (grade Air-float) représente environ 2 % seulement de la valeur de la production de kaolin des Etats Unis.

Garin (1982) a étudié la possibilité de traitement des argiles kaoliniques des Charentes. Les essais de traitement ont été effectués avec des circuits pneumatiques à l'aide de sélecteurs dynamiques qui ont une fonction de cyclonage améliorée pour assurer une coupure efficace dans le domaine de 8 à 30 μm . et des broyeurs-sélecteurs (jusqu'à 12-15 μm). Les broyeurs-sélecteurs sont plus performants, mais leur consommation énergétique est plus élevée.

II.5.4.2. Traitement par voie humide :

Le traitement de l'argile brute est beaucoup plus complexe par voie humide. Mais il permet d'obtenir un produit d'une valeur considérablement plus élevée, et correspond à la majeure partie du kaolin produit dans l'état de Géorgie (premier producteur de kaolin). Un des objectifs principaux du processus de traitement est la séparation totale ou d'une portion sensiblement importante de toutes les impuretés colorantes dans le but de décolorer l'argile.

La lixiviation réductrice, le blanchiment aux acides (Casanova 1975, Murray 1980, Sennet et al. 1978) ou aux acides organiques (Camesselle et al. 1999) et la séparation magnétique sont employés pour enlever les oxydes de fer. On enlève les dioxydes de titane-fer par la séparation magnétique (Newns et Pascoe 2002). Les séparateurs magnétiques (HGMS) sont utilisés dans le traitement du kaolin de Cornouaille (Wills 1992, Hoyer et Morgan). L'utilisation des supraconducteurs permet d'avoir d'un

champ magnétique très intense (Uotokumpo Technolgy), cette génération de séparateur est utilisée pour le traitement du kaolin de Géorgie. La floculation sélective (Larroyd et al. 2002, Demirel H. 1994, Karapinar et al. 1994, Ravishankar et al. 1995, Pradip et al. 1991), et la flottation (oster et al. 1992, Yoon et al. 1992, Murray 1980) sont aussi utilisées pour améliorer la blancheur des kaolins destinés à l'industrie du papier.

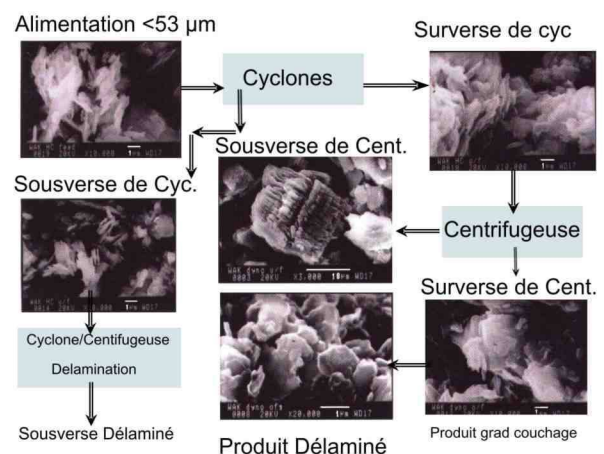
Les produits organiques sont classiquement oxydés en utilisant l'oxygène, l'ozone, le peroxyde d'hydrogène, et l'hypochlorite (US Patent 5397754), qui décomposent les molécules organiques et préparent les oxydes colorants de fer pour le traitement par lixiviation réductrice. Le lessivage complet de ces impuretés est pratiquement impossible, en grande partie en raison des limitations imposées par le coût du processus (González et Ruiz 2006).

Un kaolin typique traité par voie humide, subit les étapes suivantes :

- Délaiage (mélange avec de l'eau à énergie élevée), pour produire un pulpe à 30-40 % de composant solides.
- Dessablage à -200 mesh (-75 μm), pour enlever le sable et le mica.
- Mélangeage, pour réaliser un mélange optimum de dimension particulaire, et pour l'homogénéisation (d'autres paramètres de qualité)
- Séparation centrifuge, (50 à 100 % inférieur à 2 μm)
- Délamination pour réduire la taille des particules, pour augmenter l'aspect-ratio et pour améliorer le degré de blancheur.
- Amélioration du degré de blancheur par une ou plusieurs méthodes : la lixiviation réductrice, l'oxydation par l'ozone, la flottation, ou la floculation sélective.
- Filtration à ~55% solides, séchages par vaporisation (spray drayer) ou l'évaporation, pour ramener la pulpe à la 70% de solides, ou vendre le produit sous le nom de pigment sec.
- La calcination est facultative. On l'utilise pour aboutir à un produit de degré de blancheur très élevé et plus opaque.

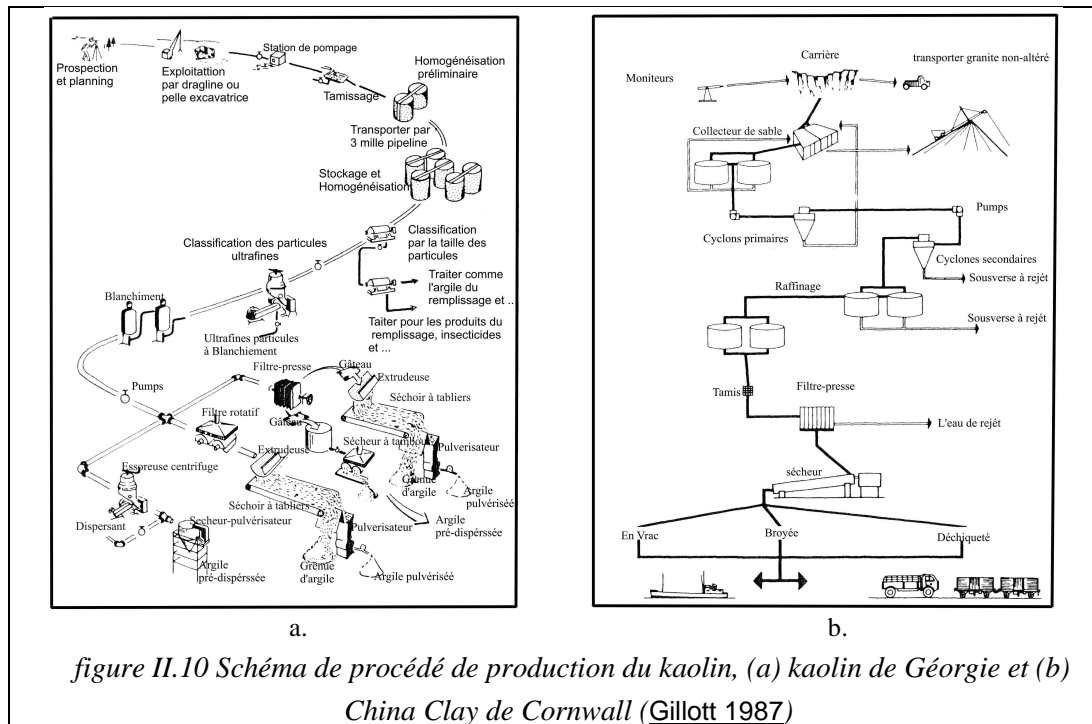
La figure II.9 et la figure II.10 (a et b) montrent les schémas industriels de la production de kaolin haute qualité pour l'industrie du papier.

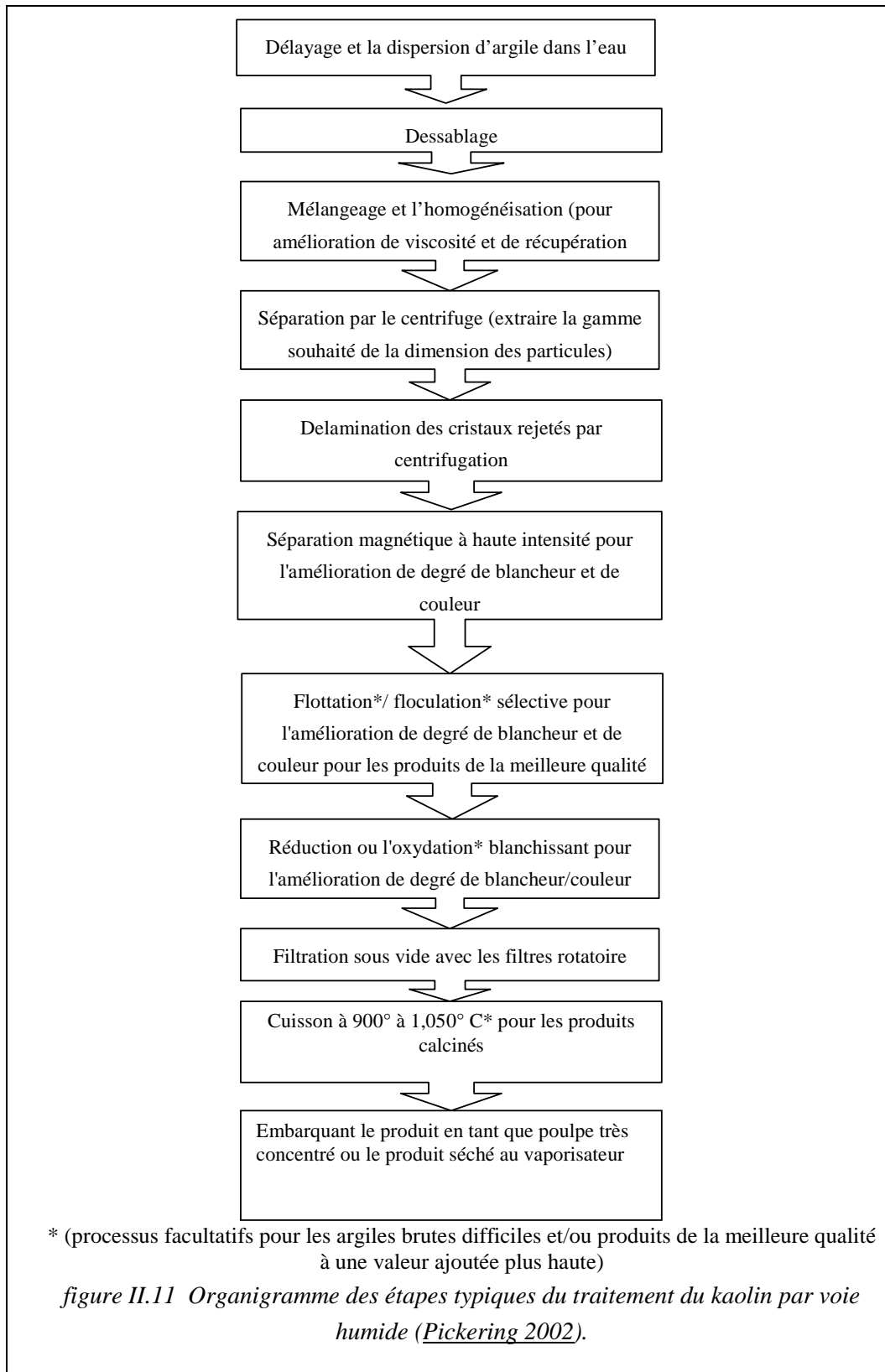
figure II.9 Schéma du procédé de production du kaolin en Cornouaille (Wilson 2006).



L'organigramme du processus est illustré dans la figure II.11. Précédemment, Goonvean traitait son kaolin, en utilisant des hydrocyclones traditionnels. Les hydrocyclones sont utilisés pour récupérer les grands cristaux de kaolin dans le rejet de la première étape de séparation d'un mélange de sable et

d'argile. Une nouvelle étude révèle la possibilité de récupération du kaolin des rejets stockés, qui est estimé à 60 Mt. (Kaolin Magic IM July 2006).





II.5.4.3. Broyage ultrafin

D'une manière générale, les charges minérales utilisées aujourd'hui sont d'une granulométrie beaucoup plus fine et la tendance se dirige vers l'échelle nanométrique (Löhle 2007).

Le broyage à sec par jets de fluide gazeux opposés, avec ou sans lit fluidisé, ou par vibration est très utilisé pour les minéraux industriels. Le délaminage de la kaolinite lui donne une surface spécifique plus importante.

II.5.4.4. Calcination

La calcination est un traitement qui est employé pour produire les produits à valeur ajoutée particulière à partir du kaolin. La calcination implique le chauffage à hautes températures, pour chasser l'eau structurale et pour réorganiser l'alumine et la silice dans de nouvelles phases. Un produit est chauffé à une température de ~650-700 °C qui est au-dessus de la température normale de ~550-570 °C de déshydroxylation. Le métakaolin est un excellent diélectrique. Ce produit est utilisé comme charge dans les gaines de fils électriques. La calcination du kaolin à 650°C peut améliorer les propriétés optiques du kaolin (Gamiz et al. 2005). La calcination sature la coloration rouge (augmentation de C_{ab}) sans diminuer la clarté.

Un deuxième type de produit calciné est chauffé à ~1050 °C, au-delà de la température où le métakaolin est réorganisé pour former la mullite, le spinelle et la cristobalite. Ces mullite et/ou les aiguilles de spinelle qui apparaissent sur la surface de l'ancienne particule de kaolinite sont excellents pour la dispersion de la lumière. Cela donne au produit un degré de blancheur élevé et de bonne opacité. Ce produit est employé comme substitut à TiO_2 . Ce remplacement se fait dans beaucoup d'applications afin de réduire des coûts de formulation, en particulier dans l'industrie du papier, et en peintures.

Un autre marché pour ce produit est son utilisation en tant qu'abrasif très fin, en particulier dans des poliss d'automobile et des produits de nettoyage.

Un troisième produit calciné est chauffé à ~1300 °C pour produire une chamotte réfractaire qui peut être ajouté aux mélanges réfractaires pour réduire le retrait et pour augmenter le caractère réfractaire.

II.5.4.5. Lixiviation biologique

La lixiviation bactérienne est une technique applicable à l'amélioration de la qualité des kaolins utilisés dans l'industrie en céramique. Des bactéries peuvent en effet éliminer tout ou partie de la teneur en fer, fer libre aussi bien que fer lié au mica, qui colore souvent des kaolins. Le Fer insoluble (III) dans des particules d'argile peut être lixivié en tant que Fer (II) soluble. La réaction de réduction de Fer (III) a été couplée à l'oxydation des sucres tels que le glucose, le maltose et le sucrose. Ce processus est long mais très avantageux en ce qui concerne les coûts et l'écologie.

Le métabolisme de *Bacillus cereuse* permet après 3 mois de biolixiviation de l'échantillon de kaolin une extraction de 49 % des atomes de fer en position octaédrique tandis que le déplacement de l'aluminium était seulement d'environ 5% (Styriakova et al. 2003).

Lee et al. (1999) ont obtenu un lessivage maximum de 44-45 % en utilisant une quantité relativement élevée de sucre de 5 % (rapport volumique de sucre/argile). Par le traitement microbien, la blancheur de l'argile a été augmentée de 63 à 80, tandis que l'indice de rouge a été clairement diminué de 13. à 3.5. Hosseini et al. (2007) ont utilisé *Aspergillus niger* pour lixivier le fer d'un kaolin fortement coloré ($Fe_2O_3 = 11.11 \%$, $TiO_2 = 2.7 \%$). Le maximum du lessivage (42.8 %) a été obtenu en employant une densité de pulpe de 20 g/l.

II.5.4.6. Traitement de surface

Comme mentionné précédemment, la kaolinite est hydrophile et peut être facilement dispersée dans l'eau. Des agents modifiants ioniques et/ou non ioniques polaires peuvent être appliqués pour produire les particules qui ont des caractéristiques hydrophobes ou organophiles. Ce type de kaolin est employé intensivement dans les industries du plastique et du caoutchouc pour améliorer la dispersion et pour produire des charges plus fonctionnelles (Murray 1999).

On est souvent amené à traiter les argiles dans des systèmes spéciaux qui vont de la tour de pulvérisation en circuit pneumatique au mélangeur réacteur chauffant. Par des processus plus complexe, on arrive à greffer des polymères à la surface des particules d'argile (Garin 1982)

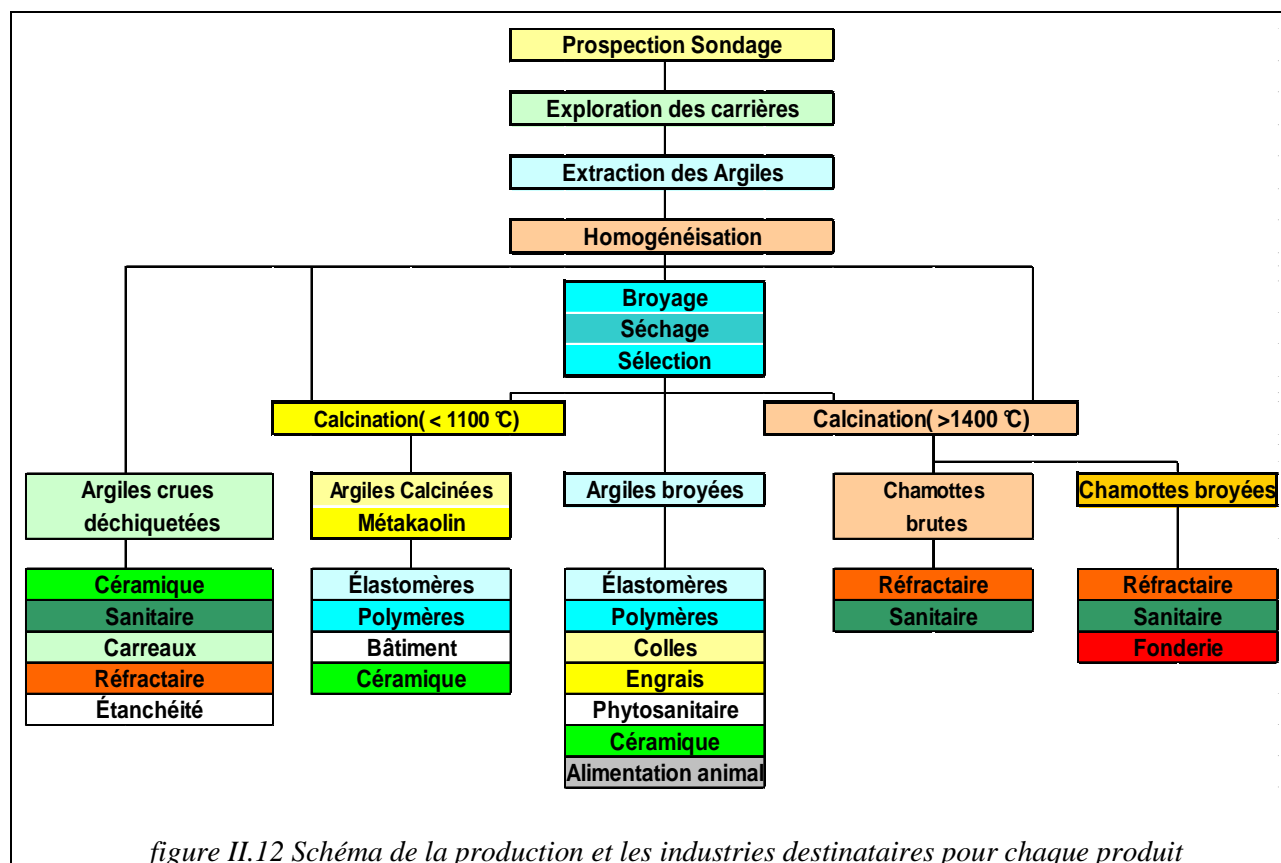
II.5.4.7. Traitements des kaolins des Charentes

Les traitements sont réalisés par voie sèche dans les différentes unités de production ; la figure II.12 montre le schéma de production. Suivant les traitements subis, les produits peuvent être classés dans 5 groupes ; 1-Argile crue/déchiquetée, 2-Argile broyée, 3-Argile calciné/métakaolin, 4-Chamotte et 5-Chamotte broyée.

(a) Emottage

Cette préparation mécanique réalisée à l'aide de déchiqueteurs à cylindres permet d'une part d'effectuer des opérations du mélange et d'autre part d'obtenir directement des argiles crues commerciales.

Un déchiqueteur est utilisé pour broyer des mottes argileuses, et assurer en même temps une fonction de mélangeur (figure II.13).



(b) Broyage – séchage –sélection

Les argiles sélectionnées sont dans ce cas introduites dans une chaîne de traitement plus complexe dont les étapes essentielles sont le séchage pour éliminer l'eau libre et quelques traces de matières organiques, le broyage pour réduire la taille des particules, la sélection dynamique couplée aux opérations de cyclonage pour extraire une partie des impuretés (les particules grossières et les nodules de pyrite).

Le cyclonage peut être utilisé pour obtenir des produits aux caractéristiques granulométriques définies.



figure II.13 Deux trémies asservies (b) pour alimenter le déchiqueteur (a) : le taux de passage est contrôlé par la vitesse relative de rotation d'une bande par rapport à l'autre.

(c) Traitements de surface

Dans certaines applications comme les charges minérales, il est parfois nécessaire de modifier les propriétés de surface des argiles afin de les rendre plus compatibles avec les matrices organiques dans lesquelles elles peuvent être incorporées.

(d) Bouletage – calcination

Les argiles en provenance des carrières ou de l'unité de broyage- sélection, subissent une mise en forme par pressage ou extrusion afin d'obtenir des boulets ou des boudins, formes sous lesquelles elles sont introduites dans une ligne de cuisson à haute température (1450°C). Cette calcination a pour effet une modification complète de leur nature minéralogique.

La chamotte, produit résultant, est un mélange silicaté à base de mullite et cristobalite qui a une haute résistance pyroscopique (Négroni 2003).

II.5.5. Homogénéisation de l'alimentation et du produit

L'homogénéité est un terme qualitatif ; pour le traduire en terme mathématique et mesurable, on utilise la notion de la variance et de la variabilité. Il existe des relations entre le volume d'échantillon et la variance et donc, l'homogénéité d'une masse dépendra de l'échelle choisie pour étudier la variabilité.

Ainsi les paramètres opérationnels de l'exploitation, de la manipulation, de la préparation et du traitement peuvent affecter le modèle initial de variabilité. Chaque opération de la desserte, du concassage, du déchiquetage, du stockage, du broyage contribue à la variabilité. Il y a 4 domaines de traitement principaux disponibles pour l'homogénéisation des matières premières :

- La carrière
- Le dépôt de concassage
- La chaîne de concassage et de broyage
- L'homogénéisation pendant le processus ou après processus pour produire un produit final homogène (Schofield 1980).

En fait les stocks ont trois usages principaux ;

- le simple stockage de matériaux.
- La réduction de la variabilité par mélange de provenance
- La sélection de catégories différentes.

Ce dernier usage ayant un rôle du découpage de la distribution globale à des fourchettes prédéfinies de teneurs.

La méthode d'extraction sélective basée sur une connaissance suffisante du dépôt est la première étape qui peut réduire la gamme de variation. Il est apprécié pour les producteurs qui ont différentes catégories de produits, sous la condition d'avoir des critères suffisants de sélection. Cela est plus particulièrement le cas des minéraux industriels.

Dans beaucoup de cas nous sommes obligés de mélanger les matériaux extraits des différentes carrières soit mélanges de catégories différentes pour arriver à alimenter l'usine par une catégorie souhaitable (avoir une teneur moyenne) soit mélange d'une même catégorie.

Dans les exploitations des kaolins charentais, les tas des catégories de réserve sont utilisés pour réduire la variabilité de la teneur. Par ce moyen, l'alimentation de l'usine sera plus homogène (à grande échelle), la deuxième utilisation de ces tas est le lissage des erreurs de l'estimation. L'erreur de la teneur sur les tranches de tas homogénéisé est inférieure à l'erreur d'estimation de chaque bloc.

Pour fabriquer les produits réfractaires, comme on a vu précédemment, l'homogénéité des composants est très importante. La formation des phases isolées d'alumine-alpha issues de la calcination des hydroxydes d'aluminium (gibbsites), baisse la teneur attendu de formation de mullite, et le verre silicaté sera plus riche en alcalins. Cela entraîne une baisse de densité (augmentation de la porosité), ainsi qu'une faible résistance mécanique et thermique



figure II.14 Système d'homogénéisation d'alimentation de processus de la calcination de l'usine orillons

II.6. Economie du kaolin

Au cours des 30 dernières années la production mondiale de kaolin a augmenté de 14 à 24.4 Mt. Dans la dernière décennie il y a cependant eu un changement considérable du modèle de production. Tandis que la production de kaolin aux Etats-Unis a augmenté de moins de 2 % par an depuis 1990 et que le rendement de Royal Uni a diminué de presque 3 % par an, par contre, au Brésil, la production de kaolin s'est développée de 9.6 % par an dans la même période (Roskil, Kaolin, 2006). La production du kaolin entre 2001-2005 est présentée dans le Tableau II.11.

Les Etats-Unis, le Brésil, le Royaume-Uni et la Chine sont les 4 plus grands producteurs de kaolin, qui ont 57 % de la production mondiale de kaolin dont plus de 50% pour les seuls Etats-Unis (30% de la production mondiale). La production du kaolin en France est de plus de 0.3 Mt par an.

Les exportations d'argiles depuis l'Ukraine, qui ont démarré en 1994, deviennent très importantes dans le domaine des matières premières pour la production de carreaux et fait chuter de façon significative les ventes des autres producteurs européens d'argile (Bal et Fiederling-Kaptienant, 2007)

Il y a quatre producteurs de kaolin de qualité papier aux Etats-Unis : Imerys (France), Engelhard Corp., le Thiele, et Huber Engineered Materials (HEM), une division du groupe J.M. Huber Corp. (Taylor 2006).

Le plus grand producteur du kaolin du monde, Imerys, opère maintenant sur les quatre continents, alors que plusieurs producteurs d'Europe occidentale ont acquis des positions en Europe de l'Est. Sibelco, bien connu en tant que producteur de sable, de silice et de feldspath, dispose maintenant d'une capacité de la production de kaolin de plus de 1 Mt/an. La concurrence a également nécessité d'investir en développant de nouvelles catégories de produits pour répondre aux demandes de plus en plus spécifiques des consommateurs principaux de kaolin.

Pour limiter les risques, les producteurs doivent offrir une large gamme de produits et diversifier leurs débouchés. Mais ceci exige un niveau d'investissement important en recherche et développement, ce qui ne peut être réalisé que par les compagnies les plus grandes.

La stagnation dans les prix de la fin des années 90 n'a pas encouragé l'investissement dans de nouveaux projets dans le kaolin. L'investissement a simplement visé à améliorer la productivité et à baisser les coûts de production.

Presque la moitié de tout le kaolin produit est utilisé pour fabrication du papier, et le kaolin est le minéral favori dans des demandes de papiers de hautes qualités. Il continuera, cependant à faire face à la concurrence des carbonates. Roskill (2006) prévoit que la croissance sera limitée à 1 % par an dans cette application. La croissance de la demande des applications en céramique pourrait s'élever à 2 % par an, mais les catégories de kaolin utilisées sont de qualités inférieures

Les producteurs essaient de transmettre les coûts croissants de traitement du kaolin sur les consommateurs mais une combinaison de croissance limitée de la demande, de concurrence d'autres minerais de charges et de marges de plus en plus réduites chez les consommateurs principaux, limitera les hausses.

Tableau II.11 Production du kaolin 2001-2005 (Hetherington et al 2007).

Continent	Pays	2001	2002	2003	2004	2005
Europe	Albanie				300 000	310 000
	Autriche	20 047	21 212	15 034	16 345	55 508
	Belgique	*300 000	*300 000	*300 000	*300 000	*300 000
	Bosnie et la Herzégovine	13 000	6 500			
	Bulgarie	*140 000	*150 000	*120 000	*190 000	*200 000
	République Tchèque (h)	561 600	562 300	582 100	639 100	639 300
	France	377 000	339 000	335 000	316 000	293 000
	Allemagne (G)	696 832	740 821	738 123	*740 000	*750 000
	Grèce	60 075	57 885	59 680	53 438	49 912
	Hongrie				3 300	1 300
	Italie	295 263	174 990	224 755	246 608 ...	
	Pologne (k)	103 220	89 372	106 761	130 596	159 207
	Portugal	148 706	147 448	169 669	*170 000	
	Roumanie	21 867	22 517	25 741	22 338	26 772
	Russie	*45 000	*45 000	*45 000	*45 000	*45 000
	Serbie et le Montenegro	60 900	95 622	99 460	14 122	
	Slovaquie	34 730	24 600	24 800	89 424	34 830
	Espagne (k)	*400 000	419 483	427 193	437 990	450 000
	Turquie	505 773	372 344	370 455	536 008	615 271
	Ukraine (h)	*170 000	*170 000	169 900	202 300	216 600
	Royaume-Uni (a) (l)	2 204 156	2 162 815	2 097 137	1 944 955	1 908 000
Afrique	Algérie	13 356	9 505	19 258	27 700	34 386
	Egypte	260 000	260 000	*260 000	249 761	*250 000
	Ethiopie (b)	1 790	3 534	3 088	4 251	3 726
	Kenya	700	*700	*700	*700	*700
	Nigeria	32 090	52 352	57 587		
	Afrique du Sud	83 500	91 456	86 365	81 901	60 072
Amérique	Mexique	681 709	745 498	798 407	654 711	877 147
	Etats-Unis (e)	8 110 000	8 010 000	7 680 000	7 760 000	*7 720 000
	Argentine	13 584	13 865	19 219	39 072	54 705
	Brésil (h)	1 817 419	1 757 488	2 081 000	2 381 000	2 410 000
	Chili	5 300	6 164	9 000	7 133	15 183
	Equateur	8 818	8 483	11 884	5 646	5 928
	Paraguay	*66 500	*66 700			
	Pérou	5 478	1 934	2 653	2 720	2 567
	Venezuela	*10 000	*10 000	*10 000	*10 000	*10 000

Tableau II.11.suite. Production du kaolin 2001-2005 (Hetherington et al 2007).

Continent	Pays	2001	2002	2003	2004	2005
Asie	Bangladesh (d)	*8 000	*8 000	9 630	13 113	13 738
	Chine	*1 500 000	*1 500 000	*1 600 000	*1 800 000	*1 800 000
	Inde (c) (i)	187 232	204 694	209 920	220 262	238 759
	Indonésie	*15 000	*15 000	*15 000	*15 000	*15 000
	Iran (j)	760 615	592 803	556 003	596 886	*600 000
	Japon	17 240	11 602	12 223	11 553	*12 000
	Jordanie	24 124	39 745	36 528	51 836	62 947
	Kazakhstan	*20 000	*20 000	*20 000		
	République de la Corée	850 360	1 054 543	1 042 018	936 537	702 295
	Malaisie	364 458	323 916	425 942	326 928	494 511
	Pakistan (d)	12 980	55 584	39 575	25 204	37 732
	Philippines	5 111	*5 000	1 860	3 240	6 927
	Arabie Saoudite	7 740	7 920	8 100	*8 000	*8 000
	Sri Lanka	9 403	8 613	9 073	16 233	9 914
	Taiwan	28 921	18 403	22 448	35 001	9 423
	Thaïlande (h)	181 583	130 282	185 512	200 671	165 884
	Ouzbékistan (i)	*150 000	*150 000	*150 000	*150 000	*150 000
	Vietnam	*600 000	*600 000	*650 000	*650 000	*650 000
Océanique	Australie (d) (f)	232 000	228 000	280 000	285 543	231 611
	Nouvelle Zélande	15 620	17 250	14 770	15 250	15 750
Total du monde		22 600 000	22 200 000	22 600 000	23 100 000	23 300 000

Note :

- * Estimée
- (1) En ajoutant des pays comme le Danemark qui est censé produire du kaolin
- (a) Vendus
- (b) Les années ont fini le 7 juillet.
- (c) Les années ont fini le 31 mars.
- (d) Les années ont fini le 30 juin.
- (e) Vendu ou utilisé par des producteurs
- (f) En excluant de la Nouvelle-Galles du Sud
- (G) Kaolin lavé et sec
- (h) Kaolin traité
- (i) Kaolin traité ; exclut le kaolin normal directement utilisé
- (j) Les années ont fini le 20 mars.
- (k) Kaolin lavé
- (l) Poids sec

II.6.1. Production du kaolin au Brésil

La région nord du Brésil possède la deuxième plus grande réserve mondiale de kaolins de haute qualité (après la Géorgie et la Caroline du Sud aux Etats-Unis). La réserve est estimée à quatre billions de tonnes, ce qui représente 28.2 % des réserves mondiales. Pour ces kaolins, les principaux débouchés actuels se situent dans l'industrie papetière ([Barbosa 2002](#)).

Le Brésil est une menace importante pour l'industrie du kaolin des USA. Les zones de kaolin de Géorgie ont été extraites depuis plus de 100 ans, tandis que la production de kaolin dans la région de l'Amazonie au Brésil n'a débuté qu'il y a environ 30 ans.

Le kaolin de Rio Capim a attiré l'attention du fait de sa blancheur très élevée. Ce dépôt est situé dans la formation d'Ipixuna (crétacé supérieur- tertiaire inférieur ?), qui est exploitée dans le secteur oriental du bassin Cametá. Cette unité contient une des plus grandes réserves de kaolin dans le monde ([Santos Jr. et al. 2006 et 2007](#), [Lima de Sousa D. 2005](#)).

En faisant des sondages plus profonds, pendant la phase d'exploitation, ces chiffres devraient augmenter. Les sondages faits par Petrobras ont confirmé la présence du matériel sédimentaire kaolinique jusqu'à la profondeur de 120 mètres dans le secteur. Le kaolin présente une amélioration progressive de ses caractéristiques dans les couches inférieures, et cela donne une raison de plus pour espérer un potentiel plus important dans ce secteur ([Schulz Jr. 2000](#)).

Tous les signaux suggèrent que l'industrie au Brésil se développe fortement. Caemi domine maintenant l'approvisionnement après acquisition de CADAM (un producteur d'argiles très fines du Munguba extrayant dans le bassin du fleuve de Jari) et de PPSA (connu pour la très bonne luminosité de ces argiles de la mine d'Ipixuna dans le bassin du fleuve de Capim). La compagnie possède des explorations sur 12 secteurs principaux et a montré des réserves plus de 500 millions de tonnes pouvant augmenter de manière significative en cours d'exploitation.

Les producteurs brésiliens tels que Caulim d'Amazonie, Rio Capim Caulim et les Para et Pigmentos ont accès aux dépôts de kaolin à haute teneur pour l'industrie du papier et grâce à l'existence des dépôts riches en kaolin et à faibles teneur en impuretés, les compagnies brésiliennes ont les coûts inférieurs à celle des compagnies concurrentes d'Amérique du Nord et d'Europe.

Les exportations du Brésil ont augmenté de 580000t en 1995 à 1.44 Mt en 2002 et on estime que cette augmentation va continuer ([Bruke, 2006](#))

II.6.2. Production de kaolin en Chine

La Chine est un producteur significatif de kaolin avec une production de 2.1 million tonnes en 2002. Elle représente près de 8.4% de la production mondiale (24.9 million tonnes). Les ressources en kaolin sont répandues dans tout le pays et sont très variées dans leur origine, leurs propriétés chimique et physique et leur morphologie.

L'industrie du kaolin, comparée à l'Europe et aux Etats-Unis, est composée des petits secteurs, sans une grande compagnie. En 2002, la Chine était le plus grand producteur du monde de céramique, en particulier pour la porcelaine et les sanitaires. La production des sanitaires va continuer à croître. La production de 130 millions pièces est attendue en 2010 ([Wilson 2007](#)). En outre, la Chine est maintenant le deuxième plus grand producteur de papier et de papier cartonné dans le monde. La qualité du kaolin et de l'halloysite convient à la céramique sans besoin d'importer. Cependant, la qualité de l'argile pour papier existant n'est pas à l' hauteur de la qualité du kaolin importé du Brésil et des Etats-Unis ([Wilson 2004](#), [Wilson 2006](#)).

II.6.3. Production de kaolin en Charentes

AGS-Minéraux, a récemment (28 fèv 2006) été acheté par Imerys le producteur mondial numéro 1 de kaolin. AGS est le leader européen de la production d'argiles calcinées. Les ventes d'AGS sont estimées à environ 50 m€ pour ces produits, essentiellement la chamotte et du métakaolin. Imerys a pris des décisions clés de restructuration et développement. Dans le bilan de 2006 du secteur réfractaire,

abrasifs et filtration d'Imerys on observe une augmentation de 30% par rapport à 2005 (787.8 M€ contre 603.9 m€ en 2005). En 2007, céramiques, réfractaires, abrasifs et filtration correspondront à 37% des ventes, au lieu de 35% pour 2005. Cette puissance permet à Imerys d'effectuer de nouveaux investissements que l'on peut estimer de l'ordre de 557 M€ (IM 4/2007).

Grâce au biogaz, AGS réalisera une économie d'énergie de primaire de 2000 tonnes équivalent pétrole (TEP) par an. Le biogaz provient d'ordures ménagères et de déchets industriels d'un Centre de stockage pour déchet ultime (CSDU), qui utilise une ancienne carrière d'argile de Clérac (icv, n°1012 p.21).

II.7. Conclusion

Le kaolin est un des minéraux industriels aux usages très divers. La diversification des usages est aussi suivie par les producteurs. Elle est considérée comme une politique permettant d'obtenir une moindre sensibilité aux variations du marché dans un secteur défini. La gestion des ressources en kaolin nécessite une compréhension fine de ses propriétés industrielles, dépendant elles-mêmes du rôle de ses divers composants minéraux. La caractérisation des argiles kaoliniques est donc un réel problème industriel.

Du fait de la présence des nombreux facteurs influant sur le résultat des procédés de calcination des diverses argiles kaoliniques, il est important :

- de comprendre la variation de ces facteurs à l'intérieur des gisements. Cela mène à l'étude de la géologie des gisements du kaolin et à l'élaboration de modèles de la genèse des gisements, (ce sera le sujet du chapitre prochain).
- de comprendre la relation entre ces facteurs,. Le chapitre IV porte sur les analyses statistiques, et abordera spécifiquement l'examen de ces corrélations.

III. GEOLOGIE DU KAOLIN ; CAS DU BASSIN DES CHARENTES

On présente ici brièvement la géologie du bassin des Charentes. Une étude bibliographique est faite sur la géologie de gisements similaires de Géorgie (USA) et du Brésil. Cela permet de mieux comprendre les processus de formation des gisements kaoliniques du bassin des Charentes.

Les gisements actuels du bassin des Charentes sont plus riches en Al_2O_3 que ceux déjà exploités. On constate la présence d'argiles hyperalumineuses dans ces gisements: une partie de ce chapitre est donc consacrée à l'étude de leur formation.

III.1. Géologie et la formation du kaolin

Avant de décrire l'origine des argiles kaoliniques du bassin des Charentes, Il paraît nécessaire de rappeler brièvement les connaissances concernant la genèse de la kaolinite, les paramètres et les phénomènes déterminants la composition minéralogiques du kaolin. A titre d'exemple la formation des kaolins commerciaux de Georgie et de Caroline du sud est brièvement présentée.

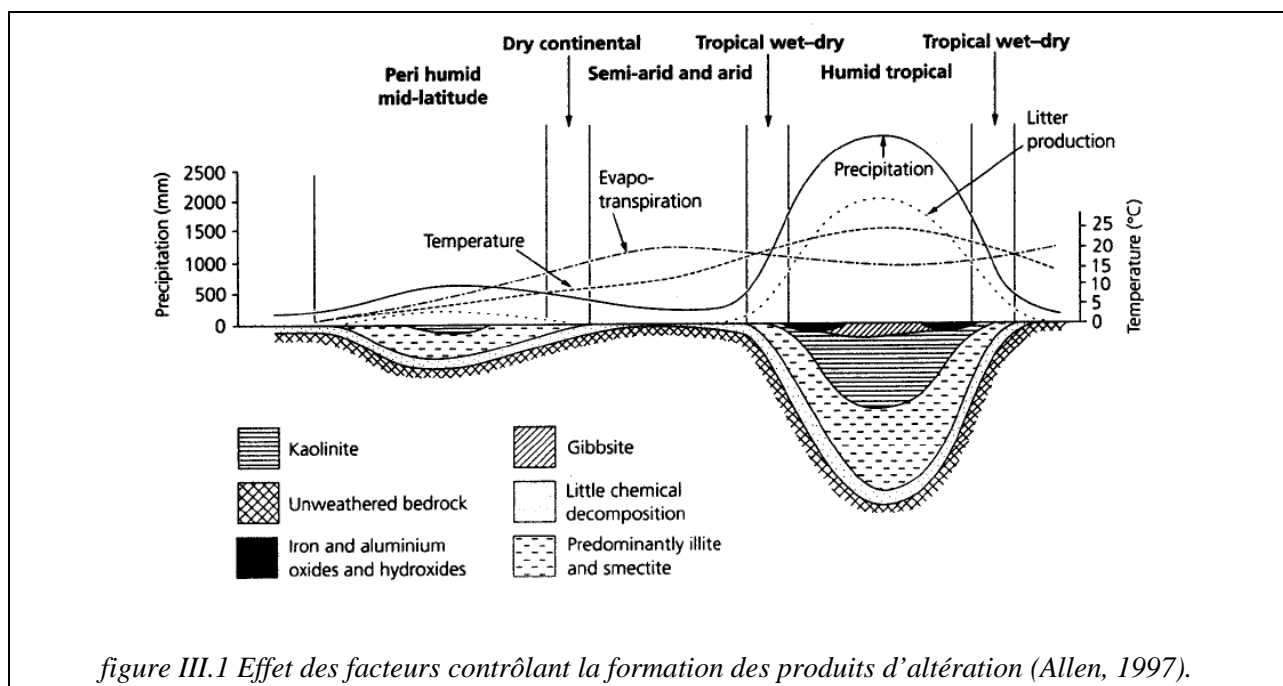
III.1.1. Introduction

Les minéraux argileux résultent soit de la désagrégation (altération physique) d'une roche argileuse préexistante appelée roche primaire (minéraux hérités) soit de l'altération chimique par transformation d'un minéral (minéraux secondaires) soit de la précipitation à partir d'une solution (minéraux néoformés). Chacun de ces modes de formation donne des informations sur

- les conditions d'altération au niveau de la région source ;
- les conditions de transport ;
- les conditions géochimiques environnementales.

Le degré d'altération (physique et chimique) va dépendre de la combinaison de plusieurs facteurs qui vont déterminer la nature et la quantité des minéraux secondaires formés. (figure III.1). Les facteurs principaux sont :

- le climat (température, humidité, alternance saisonnière) qui contrôle le degré d'hydrolyse mais également le type de végétation, la densité de la végétation, l'intensité de l'activité biologique ;
- le relief qui détermine le degré de drainage ou de confinement ;
- la nature de la roche-mère qui conditionne la séquence des minéraux formés.



III.1.2. Voyage des éléments de la roche mère au kaolin

III.1.2.1. Altération initiale

La kaolinite peut être produite par l'altération d'une roche basique par une hydrolyse très forte, mais généralement on l'associe avec des roches mères feldspathiques plus acides.

La transition du granite (feldspath) à la kaolinite a été étudiée par de nombreux chercheurs dans la nature, en laboratoire et par calculs thermodynamiques. Velde (1985) cite de travaux sur ce sujet dès 1957. L'altération des feldspaths et des micas consiste en une série de réactions dans lesquelles les cations (par exemple Na, K, Ca, Mg) du minéral passent dans la solution en échange des ions H ou d'autres cations (Marshall 1962). Le lessivage intense de n'importe quel minéral silicaté conduit systématiquement à des kaolinites. Par exemple dans le cas des feldspaths potassiques on a :



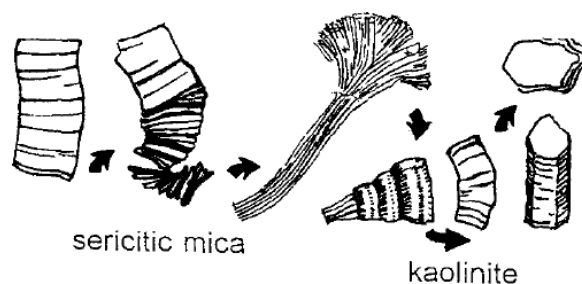
La teneur en CO_2 de l'atmosphère semble un paramètre important. Un exemple cité dans le travail de Thiry et al. (2003 et 2005), montre qu'un profil à kaolinite est obtenu trois fois plus vite (c'est-à-dire avec trois fois moins de pluviosité) quand la teneur en CO_2 de l'atmosphère est multipliée par 10, comme le prédisent, pour le Crétacé inférieur, le modèle de Berner et celui de Ekart et al. Ceci signifie qu'avec une pluviométrie similaire les profils s'approfondiraient trois fois plus vite que sous les conditions atmosphériques actuelles. L'abondance de CO_2 accélère fortement la formation de profils kaoliniques profonds, sans avoir besoin de recourir à des durées d'altération aussi longues ni des climats aussi chauds et humides qu'on ne le pensait précédemment. Ceci explique pourquoi les profils kaoliniques ont été répandus durant le Crétacé, même hors des latitudes tropicales, et sous des climats plus tempérés et moins humides que sur la terre actuelle. En revanche, l'augmentation de la pCO_2 n'a pas d'effet direct sur l'apparition de la gibbsite.

Il semble que la granulométrie (ou la surface spécifique) ne joue pas sur la vitesse d'altération des feldspaths. Une étude expérimentale a été faite par Holdren et Speyer (1985) sur la dissolution des feldspaths aux basses températures dans les solutions de pH modéré (3-9). Cette étude réalisée sur cinq fractions de taille, (600-300, 300-150, 150-75, 75-38 et 38 micron), montre que, alors que la surface spécifique varie d'un facteur de 20, le taux de dissolution ne varie que d'un facteur inférieur à 2. (Holdren et Speyer. 1985).

Comme on le verra dans le chapitre prochain, la composition du mica des kaolins des Charentes est très proche d'une phengite, c'est pourquoi on présente ici une bibliographie brève de l'altération de la biotite qui peut être un minéral initial avant l'altération. Les études de l'altération de biotite montrent que celle-ci se transforme en interstratifié biotite-vermiculite ou en vermiculite dans les séquences de sol saprolitique. Les vermiculites sont elles-mêmes finalement décomposés en kaolin et oxydes /hydroxydes métalliques (Jeong et Kim 2003). Les minéraux secondaires tels que l'oxyde de fer sont précipités la plupart du temps sur les surfaces latérales. Les observations de Murikami et al. (2003) suggèrent que le fer libéré soit précipité avant qu'il ne passe en solution. La formation des couches de vermiculite entre les couches de biotite se produit même aux étapes précoces de l'altération, quand la biotite n'est pas riche en fer [plus de 0.8 magnésium par $\text{O}_{10}(\text{OH})_2$]. Ainsi, un contenu plus élevé de magnésium dans la biotite facilite la formation de la vermiculite.

Les couches de kaolinite se développent généralement d'abord dans une partie restreinte du cristal original, procédant de couche en couche et remplaçant par la suite l'ancien cristal de biotite en totalité (Jolicoeur 2000, Murphy 1998). De cette manière la biotite prend la forme d'une vermicule de la taille d'un sable. Les études expérimentales de Malmström (1996) ont montré que la formation d'argiles peut-être rapide dans la nature (semaine-mois).

figure III.2. Schéma idéalisé indiquant les changements progressifs d'un rouleau de sérinite en piles de kaolinite (Chen et al. 1997).



Des nombreuses références citées dans les articles de Macias Vaquez (1981), Wlaker et al. (1989) et de Jolicoeur et al. (2000) montrent que la gibbsite peut apparaître pendant les étapes initiales de l'altération et sous des environnements moins sévères que le climat tropical humide généralement invoqué pour expliquer sa présence dans les formations superficielles.

Il existe un processus rapide à l'origine d'une gibbsite dite primaire, apparaissant dans l'étape initiale de l'altération de divers aluminosilicates, où elle serait l'un des premiers produits cristallins de la néoformation. Ce mécanisme a été observé pendant l'altération des plagioclases, où la gibbsite était cristallisée sur une couche amorphe formée sur les surfaces des cristaux de plagioclase. La gibbsite primaire cristallise au sein des minéraux originels de la roche mère, avec maintien des structures pétrographiques. Ainsi dans les horizons supérieurs de sols formés sur des gabbros, Macias Vaquez (1981) a constaté que la gibbsite était présente principalement dans des fragments de roche altérés. Il s'agit d'une accumulation par départ des autres composants, ce qu'on appelle une accumulation relative.

Rebertus et al. (1986) considèrent que la biotite empêche la précipitation de gibbsite du fait de son altération en vermiculite qui fournirait des sites d'absorption préférentiels dans les couches d'intercalation pour l'aluminium libéré par l'altération des minéraux.

Cependant la gibbsite est instable en présence de quartz ou d'eaux légèrement siliceuses, elle se transforme en kaolinite. Selon Thiry, on ne peut donc pas envisager de transporter la gibbsite dans les rivières et de la déposer. Ce phénomène n'est d'ailleurs pas observé dans la nature.

Le silicium est, après le carbone, l'élément majoritaire des colloïdes des eaux de circulation du sol. Ces colloïdes siliceux sont précurseurs des composés solides du sol. Dans le système podzolique il s'agit de proto-imogolite (Al/Si proche de 2) précurseur d'imogolite.

L'altération des minéraux se poursuit dans les sols (podzoliques) développés sur les roches mères (granitiques). Cela implique en particulier la décomposition des feldspaths plagioclases, de la biotite et des micas dioctahédraux à grain fin. La précipitation de l'allophane de proto-imogolite produit par la transformation de minéraux micacés préexistant comme vermiculite et smectite. Une telle altération est réalisée principalement par les effets des acides organiques. Il est possible que l'introduction d'acides minéraux dans le processus puisse produire des changements importants sur la nature du processus de l'altération et de la précipitation. Cela peut mener le système des sols plus acides à une augmentation en aluminium ionisé des eaux des sols et des ruisseaux (Wilson M.J. 1986).

Le taux d'altération augmente avec le désordre structural de la kaolinite, mais les différences observées ne peuvent pas être entièrement expliquées seulement par la diversité des structures et du réseau cristallin. Les impuretés minérales qui apparaissent généralement dans les kaolinites normales peuvent affecter le taux d'altération et également la stœchiométrie d'Al/Si du processus (Hradil et al 2002).

III.1.2.2. Transport

Les produits fins issus de l'altération peuvent être transportés par les eaux courantes. La masse transportée par les systèmes fluviaux est surprenante l'Amazone, par exemple charrie 1200×10^6 tonnes annuelles de sédiment depuis le continent sud-américain jusqu'à l'océan (Martinelli et al. 1989).

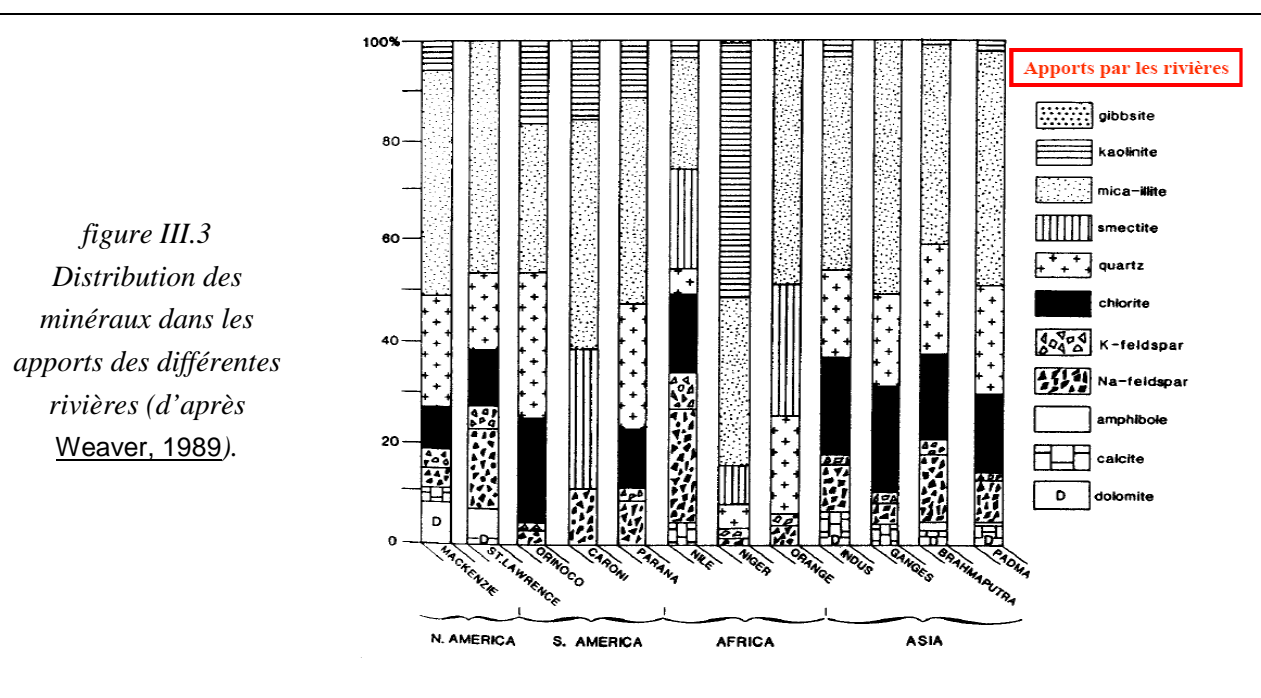
La figure III.3 montre la distribution des minéraux dans les apports de différentes rivières. La kaolinite est importante dans les rivières des régions tropicales (Niger, Congo, Nil, Orange). Compte tenu de leur taille, les argiles vont rester longtemps en suspension et vont donc être transportées en suspension préférentiellement par rapport aux autres minéraux des fractions plus grossières. On constate de plus un enrichissement progressif des rivières vers les océans ou les lacs.

III.1.2.3. Sédimentation

Hurst et Pickering (1997) ne pensent pas que les processus sédimentaires soient capables de produire à eux seuls un kaolin commercial (blanc et pur), ceci pour deux raisons bien connues :

1) l'altération, qui produit des particules de kaolinite, produit simultanément des particules hydrauliquement équivalentes de smectite, d'illite, d'illite/smectite et de pigments ferriques. Matière organique et silice biogénique s'ajoutent au cours du transport ou lors du dépôt. Ces composés intimement associés ne peuvent pas être séparés efficacement par des processus sédimentaires.

2) les forces extérieures (surface des cristaux) influencent fortement le comportement des particules d'argile (ou ayant la taille de l'argile) en suspension et empêchent leur séparation hydraulique.



III.1.2.4. Altération secondaire

L'aluminium est moins mobile des éléments qui nous intéressent. La poursuite de l'altération transforme logiquement la kaolinite en hydroxyde d'alumine, en libérant de la silice en solution. Ceci exige la présence de matières organiques et des eaux acides.

Cailleres et al. (1989) citent les expériences de G. Pedro soumettant divers types de roches à un lessivage intensif dans un appareil extracteur ; quand l'atmosphère du soxhlet est enrichie en CO₂, le fer est également éliminé. Le produit restant ne contient plus que des hydroxydes d'aluminium, gibbsite et boehmite.

Les expériences rapportées par Robert et al (1979) montrent qu'il existe des différences significatives dans la décomposition des minéraux en milieu acide selon le type d'acide utilisé. Ces expériences ont comparé les effets (pH des 3 à 5) des acides complexes organiques, tels qu'acide oxaliques, citriques et tartriques et des acides minéraux dilués sur des divers minerais micacés. Les acides complexes sont capables d'extraire deux à trois fois plus d'aluminium que les acides minéraux (HCl et H₂SO₄) au même pH. Par ailleurs il apparaît que les acides complexes provoquent la désorganisation

complète de la structure minérale tandis que les acides minéraux induisent la formation de l'hydroxyde d'aluminium inter-stratifié des vermiculites.

La gibbsite secondaire se surimpose aux anciennes structures dans les joints, fissures et pores. Pour cette raison, elle est considérée comme une addition ou accumulation absolue. La gibbsite se forme sur place sous l'influence de milieux acides et organiques qui favorisent l'attaque de la kaolinite, la solubilisation de l'aluminium, puis son évacuation et sa précipitation sous forme de gibbsite quand les solutions sont neutralisées/oxydées. Le transport est faible. Ce ne sont pas les niveaux argileux qui fournissent Al, mais les niveaux organiques, ligniteux, qui sont beaucoup plus perméables. C'est souvent à proximité des lentilles ligniteuses que l'on a des argiles à gibbsite associées à des kaolinites très bien cristallisées (qui doivent avoir une origine similaire par précipitation à partir de l'aluminium et de la silice des solutions).

Cette acidification résulterait de l'oxydation de sables pyriteux (production d'acide sulfurique), ou selon les cas, du lessivage des accumulations ligniteuses (enrichissement de l'eau en acides organiques).

Cependant on trouve également des kaolinites à gibbsite dans des environnements dépourvus de matières organiques et riches en oxydes de fer (bassin de Sydney) ([Loughnan, 1978](#)).

Des zones verticales allongées d'argile blanche sont observées dans les matrices d'argile ferrugineuse rouge. Ces zones sont probablement développées par la dissolution des oxydes de fer autour des racines d'arbre. Le déplacement du fer autour des racines d'arbre étant affecté par la masse microbienne de la matière organique, qui produit une condition réductrice, dans laquelle les oxydes Fe^{3+} sont dissous et redistribués ([Phag et al. 2004](#))

III.1.3. Minéralogie des kaolins

Les kaolinites ont des formes variées, la taille observées varient de 0,1 à 0,8 μm . En général leurs formes sont hexagonales typiques à presque losangiques. Les kaolinites observées contiennent presque toujours du fer ; sur les particules claires, la sonde X donne un rapport pondéral $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 0,01 à 0,03. Certaines kaolinites semblent recouvertes d'une pellicule sombre, la teneur en fer est nettement supérieure à celle de "kaolinites plus claires", de forme plus géométriques. La plus grande opacité pourrait résulter de la présence de fer recouvrant les particules ([Esteoule-Choux J.1981](#), [Keller W.D., 1976, 1977 et 1978](#)).

L'oxyde de titane se présente généralement sous forme d'anatase, très fréquent en cubes ou en hexagones allongés, opaques, de taille variable en général faible ($< 0,2 \mu\text{m}$), mais pouvant atteindre plusieurs microns).

La gibbsite est observée sous forme globulaire, de section carrée à rectangulaire. Sa taille dépasse nettement celle des kaolinites. Dans le plan observé sa taille avoisine celle des kaolinites. La gibbsite ne contient pas de fer détectable par microanalyse X (sensibilité : environ 0,1 %).

Il existe des muscovites de toute taille, depuis la plaquette millimétrique jusqu'à la paillette micronique (illite). L'illite est en général beaucoup plus grossière que la kaolinite, et se présente sous forme de plaquettes allongées plus ou moins rectangulaires. L'estimation quantitative du fer est délicate car il est très rare d'observer des illites bien libérées des kaolinites ([Delineau 1994](#)).

Les oxydes et hydroxydes de fer se présentent en amas composés de petits grains accolés de très petite taille, on les trouve également sous forme de petites aiguilles. La taille des éléments de base est en général bien inférieure à celle des particules de kaolinite.

[Banos et al. \(1983\)](#), dans une étude de microscopie électronique de transmission à haute résolution de biotites tectoniquement déformées, ont observé des couches intercalaires partielles de brucite, qui

forment, avec les couches de talc et les couches de chlorite, interstratifiées dans la structure du mica et parallèle à la surface de clivage. La présence de brucite est interprétée par la brucitiation d'un niveau de couche intercalaire du mica. C'est un exemple d'un processus chimique à la balance atomique favorisé par des microstructures de déformation.

Le quartz dont l'analyse morphologique peut témoigner de l'histoire des sédiments, est en général plus grossier que la kaolinite, de forme variable, parfois bipyramidée ou triangulaire.

III.1.4. Origine et la formation des kaolins commerciaux de Géorgie et de Caroline du Sud

Les kaolins de la Géorgie et de Caroline du Sud qui constituent une des plus grande réserve mondiale de kaolin, sont très bien étudiés. Ils sont un bon exemple pour présenter les facteurs importants sur la formation des gisements économiques de kaolin.

Les gisements kaoliniques de Géorgie sont de type sédimentaire, composés des matériaux transportés de roches plus anciennes de Piedmont et de Blue Bridge, ces produits d'altération ont été érodés et déposés dans des étangs (eau stagnante de faible profondeur, d'extension habituellement plus petite qu'un lac et souvent colonisée par la végétation) et des lagunes près et le long du littoral pendant la fin du Crétacé et le début du Tertiaire (Edward 1963, Elza Kogel et al., 2002).

Bien que de nombreuses études aient été consacrées au sujet de la genèse des gisements de kaolin de Georgie, aucune explication n'est universellement admise pour leur origine. La polémique a porté sur deux questions principales :

- origine des différences de granulométrie (plus de 75 % < 80 µm ou moins de 45 % < 2 µm) selon les dépôts
- origine de la pureté et de la blancheur : sédimentation ou processus post sédimentaires ?

On convient généralement que la source finale pour les gisements commerciaux de kaolin sont les roches ignées et métamorphiques de la province de Piedmont. Les données des éléments traces de Dombrowski (1993) suggèrent que des kaolins fins et grossiers peuvent avoir dérivés de roches différentes du Piedmont : le granite et le gneiss seraient les roches source pour les gisements de kaolins grossiers, alors que les roche de type phyllite seraient responsables des kaolins fins. Buie (1979) a proposé la possibilité d'une origine volcanique pour les kaolins de Géorgie (Yuan J. 2002).

La plupart des chercheurs conviennent que les kaolins tertiaires fins ont été déposés dans un milieu intermédiaire (laguno-saumâtre) proche de l'environnement de la côte actuelle de Géorgie et de Caroline du Sud. Plusieurs arguments soutiennent cette conclusion, parmi lesquels :

- Le faciès lithologique des sédiments tertiaires
- La géométrie et l'ampleur latérale des gisements de kaolin
- L'association face à face des plaquettes fines de kaolin
- L'abondance de pyrite
- La présence d'opale-CT (biogénétique)
- La présence des zones de bioturbation
- La présence de traces et de microfossiles marins.

Les théories précédentes supposaient que la kaolinite a été formée principalement par une altération in situ du feldspath et du mica du granitique et des roches gneissiques du plateau du Piedmont, et que la kaolinite a été plus tard transportée par le fleuve en zone côtière. La pureté des gisements de kaolin a été attribuée au processus de sédimentation. Il apparaît actuellement que les kaolins de Géorgie ont été

déposés comme des boues organiques foncées typiques dans une séquence deltaïque de sables et de roches détritiques de plaine d'inondation et d'argiles de zones marécageuses. Ce qui est maintenant de l'argile kaolinique presque pure, a été blanchi par l'altération (zone d'enfouissement), et par l'action bactérienne, qui a joué un rôle essentiel dans le déplacement du Fer et de la matière organique (Hesrt et Pickering 1997).

Les études de Shelobolina et al (2005) démontrent que les bactéries réduisant le Fer (III) et les bactéries oxydant de Fer (II) sont présentes dans les argiles (enfouies) et qu'elles sont capables de changer l'état d'oxydation du fer dans les argiles. Ainsi, il est probable que les bactéries impliquées dans le cycle du Fer aient joué un rôle significatif dans le déplacement du fer et de la matière organique dans les argiles de sub-surface de Géorgie.

Les bactéries et les champignons (fingis) agissent avec des minéraux argileux et synthétisent des composés organiques (Styriakova et al 2004). Le rôle de ces composés a été montré comme un facteur d'affectant la mobilité des ions métalliques. Styriakova et al ont étudié la biolixiviation de kaolin et de sable. La destruction biologique du mica (avec la formation de phengite) après départ du fer du réseau du mica a mené au développement d'illite, qui a été détecté par la microanalyse (détecteur EDS). Le développement d'illite augmente la fraction fine de l'échantillon (Styriakova I. et al. 2003).

Les paragraphes suivants offrent un résumé simplifié des événements significatifs qui sont maintenant pensés pour s'être produits pendant la formation des kaolins commercialement utiles dans la zone de la plaine côtière de la Géorgie selon Yuan 2002).

(a) Étape 1 (oxydant, pH presque neutre)

Pendant le crétacé et le début du tertiaire, un sol profondément altéré se développe sur les roches granitiques, beaucoup plus anciennes, de Piedmont et de Blue Ridge. L'altération est accentuée par le climat chaud et l'humidité et l'action agressive des micro-organismes, qui colonisent les roches exposées. Cette altération conduit au lessivage du calcium, du sodium et du potassium des feldspaths, éléments remplacés par les ions hydroxydes. De grandes quantités de sol latéritiques et de saprolite se sont formées de cette façon, contenant la kaolinite, l'illite, sable de quartz, et micas, aussi bien qu'oxydes de titane et de fer. Lors du soulèvement du Piedmont et du secteur de Blue Ridge l'érosion de la zone superficielle intervient, avec transport par des fleuves sous forme de sédiments boueux

Des fragments saprolitiques moins altérés sont déposés dans la partie supérieure des deltas, alors que les matériaux fins plus riches en argile sont déposés dans les environnements à plus basse énergie.

(b) Étape II (réducteur, pH presque neutre)

Les argiles ont été déposées dans des zones à très basses énergies, en environnements marécageux à pente faible avec développement d'une végétation abondante. La floculation des argiles (particulièrement ceux du kaolin fin du terme de Jeffersonville) a pu être facilitée par l'incursion périodique d'eau saumâtre pendant les périodes de tempêtes.

L'oxygène disponible dans le sédiment de l'eau du fleuve et de l'onde de tempête, est consommé rapidement par les micro-organismes hétérotrophes aérobies, qui métabolisaient la matière végétale en décomposition. L'environnement devenu fortement réducteur conduit au développement des bactéries anaérobies, et à la formation de la pyrite en raison de la réduction des sulfates organiques en sulfure d'hydrogène (H_2S) qui réagit avec Fe^{2+} .

(c) Étape III (oxydant, pH devenant acide)

Après plusieurs cycles d'émersion postérieurs au dépôt du kaolin, il y a eu des étapes intermittentes d'altération et d'érosion latéritique subaérienne, développant des discordances sur les surfaces exposées

des lentilles d'argile, qui développent des paléosols. Dès cette étape la cristallisation et la recristallisation de la kaolinite a commencé.

La bioturbation intense dans et à la surface de la discordance au dessus des kaolins correspond à des conditions oxydantes qui ont intensifié l'action bactérienne aérobie. La lixiviation latéritique aboutit au lessivage de Na, Ca et K de presque tout le feldspath restant ; la muscovite commence elle-même à se transformer en kaolinite. L'oxydation de la pyrite en hématite et en goethite débute, et l'anatase commencé à cristalliser à partir de biotites riches en Ti.

(d) Étape IV (réduction, pH restant acide)

Vers la fin d'Eocène une transgression conduit à un important dépôt (d'une épaisseur de 20 à 40 m) de sable et d'argile à smectite (Twiggs Clay). La présence d'une couche continue de smectite relativement imperméables isole les sédiments deltaïques de recharge en eaux souterraines, assurant une longue période de conditions réductrices qui ralentit l'action bactérienne qui a consommé une partie de la matière organique. La muscovite authigène pourrait avoir été produite sur les fragments détritiques de mica dans des zones riche en matière organique et lignite à la base des lentilles d'argiles.

(e) Étape V (oxydant, pH restant acides)

Au Néogène l'érosion ouvre une brèche dans les couches continues d'argiles de Twiggs, permettant l'entrée d'eaux souterraines oxygénées et légèrement acides qui vont saturer les lentilles d'argiles de la séquence deltaïque. Partout où la couverture imperméable d'argile de Twiggs est percée par l'érosion, le déplacement de matière organique reprend par oxydation chimique et action bactérienne. La recristallisation de kaolinite est ré-initiée. Le lessivage partiel du potassium de muscovite par l'eau souterraine conduit au développement de kaolinite vermiculaire très pure et de cristaux de kaolinite bordés de muscovite. La pyrite est convertie par oxydation en hématite et goethite. L'anatase cristallise à partir du titane libéré par la biotite.

Comme on constate, la formation d'un kaolin industriel est conditionnée par une série de processus physico-chimique. Même à l'intérieur d'un gisement l'intensité de ces processus peut être différente et aboutir à des kaolins de différentes qualités.

III.2. Stratigraphie et lithologie des sédiments du bassin des Charentes

Le résultat de Tableau II.8 montre que la possibilité d'intersecté d'un gisement du kaolin par la compagne de sondages au stade de la prospection (500 m) est très faible. Ce qui témoigne de l'importance d'une connaissance géologique et lithologique du bassin comme outil de la prospection. Dans cette partie on les présente brièvement.

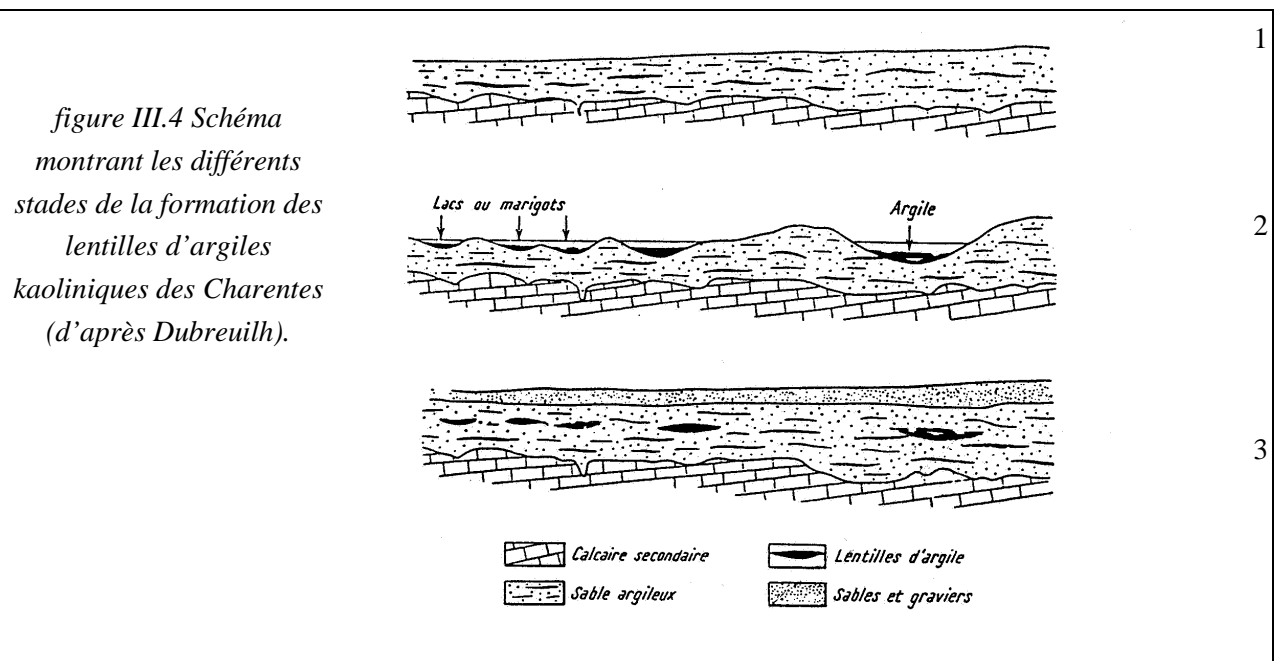
III.2.1. Formation des sédiments

Les concentrations argileuses dignes d'intérêt économique au sein des dépôts tertiaires sont constituées d'une succession complexe et apparemment désordonnée d'argiles, de sables, de graviers et de galets. Les étapes fondamentales des processus géologiques dont sont issues les argiles kaoliniques des Charentes peuvent se résumer ainsi (Kulbicki, 1953 ; Millot 1964 ; Marchadour, 1980 ; Dubreuilh et Platel, 1982) (figure III.4) ;

- installation à l'éocène inférieur d'une zone deltaïque à la bordure N-E de la mer d'Aquitaine, sur une plate-forme carbonatée présentant des reliefs structuraux qui

influencent la direction et l'organisation des chenaux d'écoulement du delta (pour plus de détaille voir figure III.9),

- mobilisation, transport fluvio-torrentiel et dépôt de produits sablo-argileux ferrugineux ("latérites") résultant de l'altération sous climat chaud et humide de granites du Massif Central.
- dépôt de lentilles d'argiles kaoliniques par séparation gravitaire à la faveur de dépressions topographiques (lacs, marécages, zone d'affaissement ou de soutirage karstique) : les ruisseaux qui alimentent ces dépressions se libèrent des sables et graviers qui sédimentent dès que l'énergie du milieu de transport chute (à l'entrée de la cuvette), tandis que l'argile sédimente lentement au cœur de la lentille. Certaines couches contiennent des accumulations ligniteuses en raison de la végétation des marécages qui tend à mourir et être enfouie sur place, et de l'érosion de la bordure des berges pratiquée par les chenaux fluviaux.



- évolution chimique et minéralogique des dépôts au cours des processus de la diagenèse avec possibilité de phénomènes de dissolution-recristallisation (néoformation de kaolinite ordonnée et de gibbsite), de réduction (formation de sulfures de fer). Possibilité d'action pédogénétique à la surface des sédiments (traces de terriers et trabécules)
- comblement par une sédimentation détritique grossière et progradation de la zone deltaïque vers la mer ouverte au sud-Ouest

III.2.2. Histoire géologique du bassin aquitain

Dubreuilh (1984) résume l'histoire géologique du bassin à façon suivante (Tableau III.1). A la fin de la période secondaire s'amorce une régression généralisée qui affectera progressivement la plate-forme nord-aquitaine. Dans la région Aquitaine, le domaine profond se situe au cœur de la cuvette landaise, et la partie septentrionale du bassin est une vaste plaine marécageuse, vers laquelle convergent deux grands émissaires venant, l'un du nord-est de la région nord-limousine et l'autre plus oriental, probablement des Monts-du-Cantal. Un troisième, de compétence nettement plus réduite intéresse la région sud-orientale,

témoin de la branche la plus septentrionale d'un édifice dont l'origine est à rechercher aux environs de la Montagne noire. La plaine d'épandage, très vaste est parcourue par un chevelu de chenaux à faible compétence, avec des étendues d'eau douce considérables, permettant l'implantation, de vastes tourbières.

A la régression succède une période d'altération intense qui affecte la plate forme nord-aquitaine, où le climat de type tropical chaud et humide, va largement contribuer à la continentalisation du bassin, par le jeu conjugué de l'altération pédogénétique, du ruissellement et de la karstification. La roche mère est altérée de toutes parts, par les agents atmosphériques. L'altération ferrallitique se développe d'abord sur les paléo-reliefs, alors que les zones basses et le domaine karstique reçoivent les faibles apports du ruissellement, dont les dépôts à caractère chimique évolueront lentement sous les effets de la diagenèse.

Durant l'Yprésien inférieur (Sparnacien Eocène inférieur) des argiles kaoliniques se décantent lentement dans de vastes étendues lacustres. Les différents émissaires construisent un vaste édifice deltaïque, au moyen de longues flèches sableuses lancées en avant au débouché de leurs exutoires. L'engorgement progressif de la plaine deltaïque durant cette période de calme tectonique relatif, va progressivement s'opérer. Quelques légers mouvements différentiels du bassin vont cependant permettre de brèves phases transgressives. A la charnière entre les apports septentrionaux et sud-orientaux se dessine un golfe où règne une sédimentation de vasière.

Dès le début de l'Yprésien supérieur (Cuisien), il y a rejeu positif du Massif-central et l'alluvionnement s'intensifie. Alors que l'instabilité du bassin ne cesse de croître, les structures anticlinales de Jonzac et Chalais-Saint-Félix sont alors marquées par un gauchissement vers le nord est, témoignant de l'intensité de la contrainte nord-sud. Les différents dispositifs de drainage se structurent et les émissaires septentrionaux assurent nettement leur prépondérance sur ceux de l'est et du sud-est.

Dès le Cuisien moyen, la mer se retire et le système deltaïque septentrional, grâce à son réseau structuré, avance fortement sur le domaine marin. La plaine deltaïque inférieure est alors marquée par le développement d'une végétation de mangrove, parcourue par un chevelu de chenaux de marée. Le delta, marqué par une forte dynamique fluviale, possède alors une configuration en « pattes d'oiseau », caractérisé par des levées importantes au débouché des distributaires assurant la progradation de l'édifice. La zone de front de delta se confond avec les talus sous-marin qui assurent l'assise de l'édifice et son avancé sur la plate-forme carbonatée.

Le climat semble plus chaud, toujours humide, avec les étendues d'eau douce nettement plus réduites. A la fin de l'Eocène inférieur, au maximum de la régression marine, la région nord-aquitaine est occupée par un bel édifice deltaïque.

Au début de l'Eocène moyen, la tendance détritique se poursuivra et s'amplifiera, par l'arrivée de puissantes décharges marquant un rajeunissement des reliefs du Massif central qui se sont surélevé sous l'effet de la compression. Les structures anticlinales préexistantes sont de nouveau gauchies vers le nord-est. Plusieurs transgressions marines viendront pénétrer les exutoires majeurs du dispositif deltaïque. Le climat chaud et humide favorise en alternance l'arrivée des décharges de type torrentiel, véritables crues boueuses. Mais l'édifice ne parvient cependant pas à assurer sa pérennité, étant déblayé en permanence par les courants de dérive littorale. Le réseau fluvial possède alors une direction nettement est-ouest, dont la sédimentation est réglée par les deux émissaires principaux débouchant dans la région centrale subsidente, où une frange languno-marine subsiste, mais nettement plus réduite géographiquement. A la fin de l'Eocène moyen, une période d'altération de type ferrallitique intervient, bien marquée sur les bordures exondées du Périgord, du Quercy et du Limousin.

A l'Eocène supérieur, la région Aquitaine est marquée par un alluvionnement intense, c'est l'apparition des faciès molassiques carbonatés d'Aquitaine.

Au début de l'Oligocène, le comblement du bassin se poursuit. Au Miocène, l'essentiel de l'histoire de la partie la plus orientale du bassin nord-aquitain est écrite. A la fin du pliocène, le bassin est totalement comblé et l'exutoire majeur, progressivement rejeté vers le nord par son propre

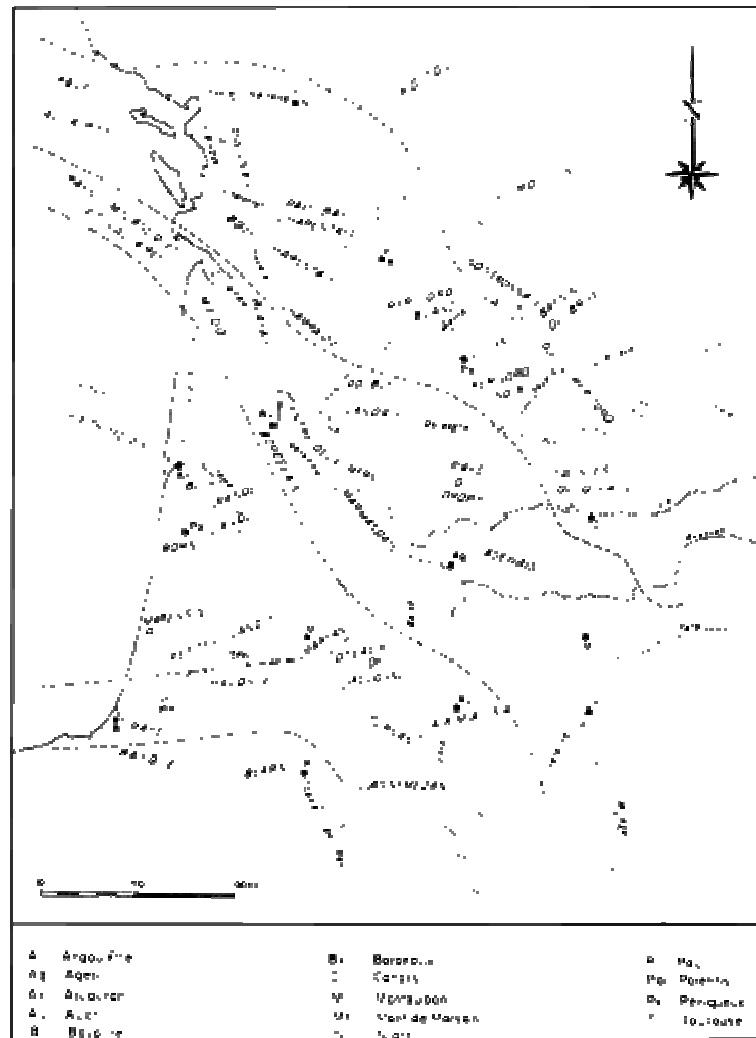
alluvionnement, acquiert la configuration de ce que l'on pourrait appeler une « paléo-Garonne », déposant les formations d'argiles à gravières du Bazadais, de l'Entre-deux-Mers, du Bourgeais et du Blayais.

Désormais à l'abri des influences marines, le bassin va être soumis à une phase de ruissellement et d'éolisations intenses, tout au long de la période post-glacière, lui donnant la configuration que nous lui connaissons aujourd'hui.

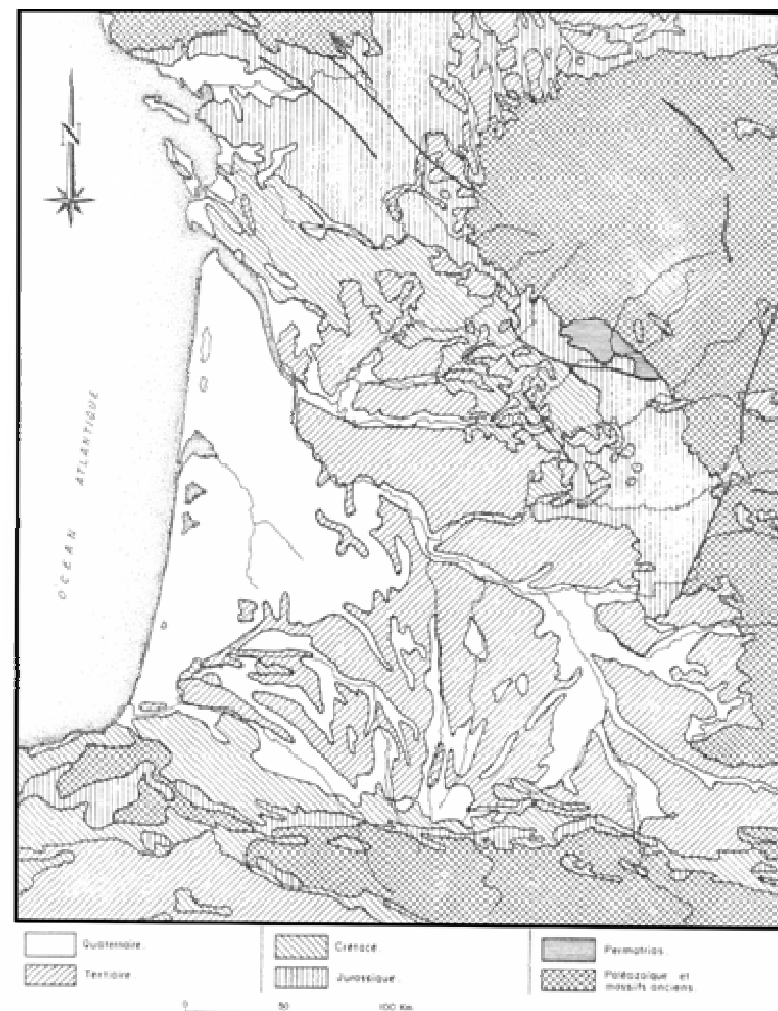
Tableau III.1 Evènements géologiques plus importants de la sédimentologie du bassin *

Ère	Système	Époque	Étage	Âge		
				Ma	±	
Quaternaire		Holocène		11430 a	130 a	
		Pléistocène		1,806	0,005	
Tertiaire	Néogène	Pliocène	Gélasien	2,588	0,005	Comblement total du bassin et l'exutoire majeur est progressivement rejeté vers le nord par son propre alluvionnement
			Plaisancien	3,600	0,005	De nouvelles décharges détritiques se déversent sur l'Aquitaine, issues à la fois du Massif central et des Pyrénées
			Zancléen	5,332	0,005	
		Miocène		23,03	0,05	Petites phases transgressives soumise à une continentalisation qui provoque la naissance des formations diagénétiques sur les bordures des étendues lacustres.
	Paléogène	Oligocène	Chattien	28,4	0,1	
			Rupélien	33,9	0,1	Poursuite du comblement du bassin avec un réseau fluvial progressivement rajeuni et plus compétant,
		Éocène	Priabonien	37,2	0,1	Alluvionnement intense, dans une vaste plaine d'inondation
			Bartonien	40,4	0,2	Développement d'une végétation de mangrove dans la plaine deltaïque inférieure,
			Lutétien	48,6	0,2	Rajeunissement des reliefs du Massif centrale, l'arrivée de puissantes décharges, Régression généralisée de la mer, avancée du système deltaïque septentrional sur le domaine marin
			Yprésien	55,8	0,2	Sédimentation dans une vaste plaine marécageuse l'implantation, de vastes tourbières.
		Paléocène	Thanetien	58,7	0,2	Régression généralisée de la mer, succession une période d'altération intense, La mise en solution des éléments crée les conditions d'un enfoncement et d'une karstification des reliefs, l'altération ferrallitique se développe d'abord sur les paléo-reliefs
			Sélandien	61,7	0,2	
			Danien	65,5	0,3	
Secondaire	Crétacé	supérieur		99,6	0,9	Phase orogénique pyrénéenne, conditionnant de la dynamique des dépotes durant tout le Tertiaire

* Etude de Dubreuilh (1982) est utilisée comme référence dans la construction de ce tableau



a.



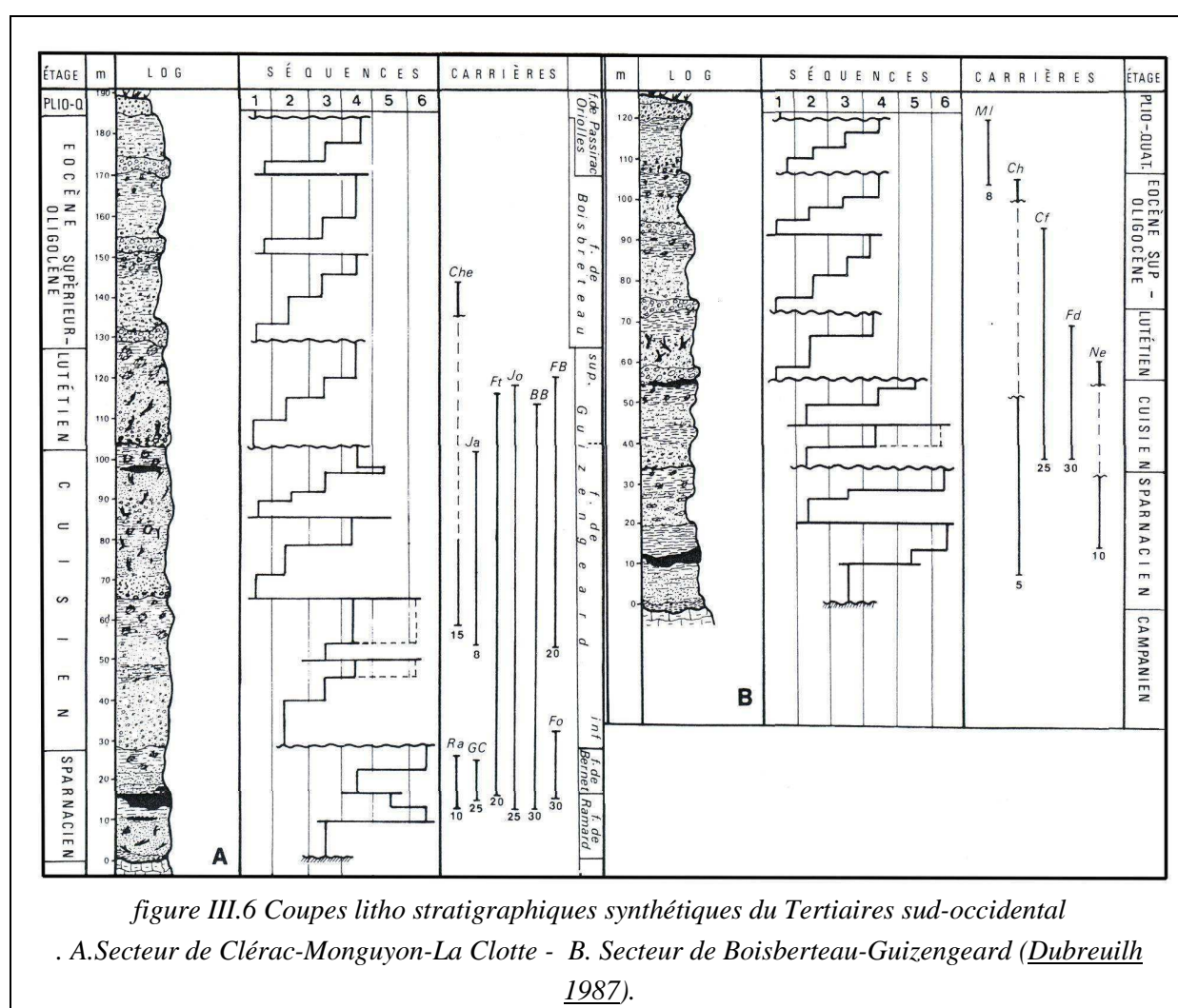
b.

figure III.5 Régions et pays d'Aquitaine Occidentale (a) et la carte géologique schématique (d'après Vigneaux, 1975).

III.2.3. La stratigraphie locale, outil de la prospection

Pour la prospection des gîtes sédimentaires, l'outil stratigraphique a un rôle primordial. En ce qui concerne les kaolins des Charentes, des datations basées sur la paléoflore ont pu être avancées par Chateaufort et al. (1977), alors que simultanément, une approche sédimentologique, par méthode séquentielle (Dubreuilh & Platel, 1980), était employée pour découper la puissante série détritique en six unités cartographique tertiaires et une unité rapportée à la base quaternaire (Carte géologique de la France à 1/50 000, Barbezieux XVI-33).

Le nombre de découpages varie selon la façon dont ces unités sont regroupées et selon la position géographique (sud ou nord du bassin). Dubreuilh et al. (1984) les présente regroupées en 4 unités : sparnacienne, cuisienne, éocène moyen et éocène supérieur à oligocène. C'est dans les deux seules unités inférieures (sparnacienne et cuisienne) que sont exploitées les argiles kaoliniques des Charentes.

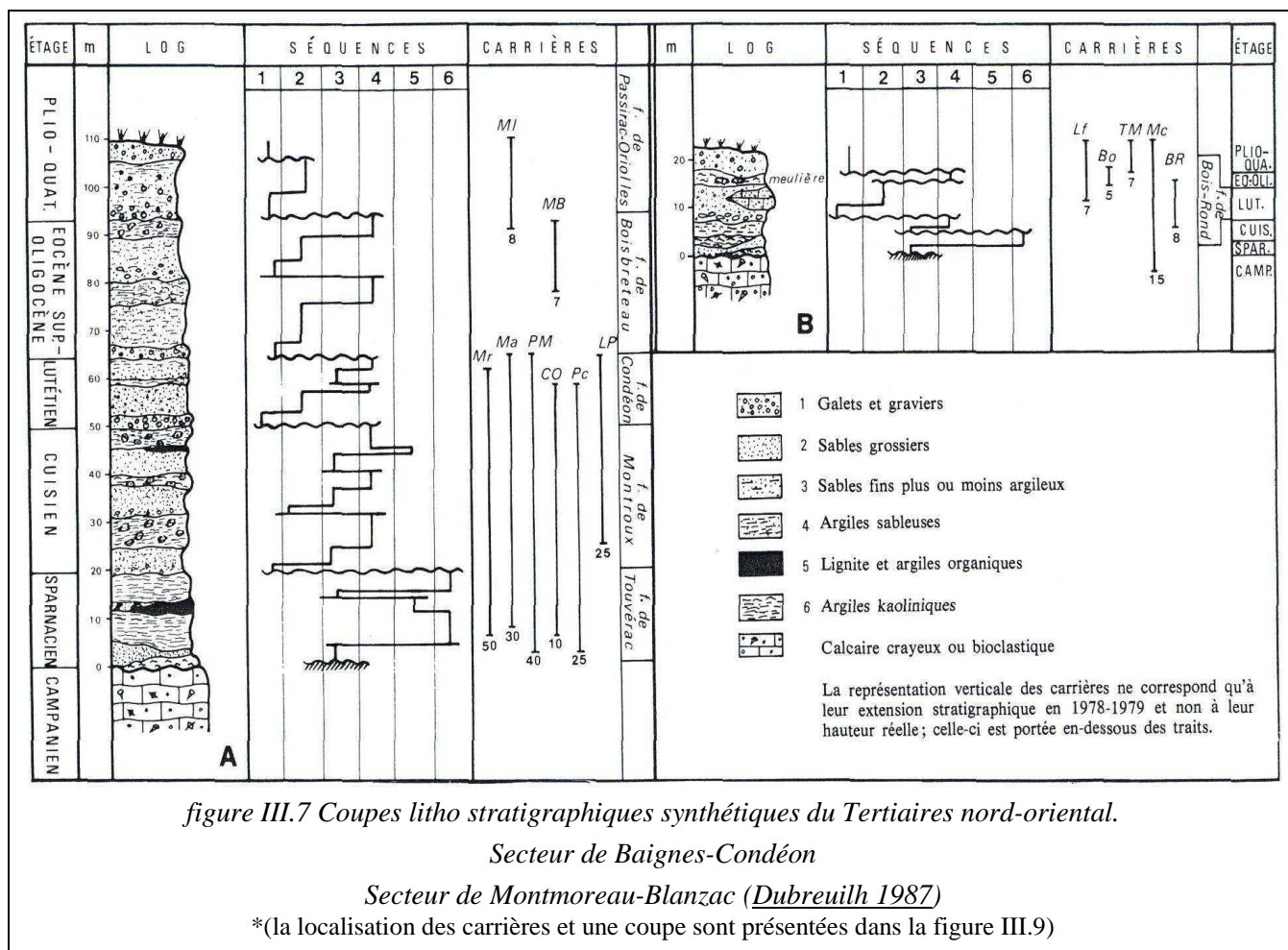


Le Tableau III.2 résume la stratigraphie tertiaire du bassin des Charentes. La figure III.6et la figure III.7 permettent de replacer la stratigraphie du bassin des Charentes dans celle du bassin. La figure II.7 permet de localiser les carrières.

Dubreuilh et Platel (1982) proposent de nombreux critères de différenciation dont les principaux sont les suivants :

Le Sparnacien inférieur (Yprésien inférieur) correspond au NE à la formation de Touvérac inférieur et au SW à la formation de Ramart. Il comprend des argiles kaoliniques gris-blanc du lignite et des sables gris. La kaolinite y forme la totalité des argiles avec, exceptionnellement 10 % d'illite dans le secteur Clérac-Montguyon.

La partie supérieure du Sparnacien correspond au NE à la formation de Touvérac supérieur et au SW à la formation du Bernet. Elle comprend des sables jaunâtres à pyrite diffuse et des argiles kaoliniques gris-blanc. L'illite est presque toujours présente avec une teneur de 10 à 20 %.



Le Sparnacien supérieur - Cuisien inférieur correspond au NE à la formation de Montroux au SW à la partie inférieure de la formation Guizengeard. Il comprend des argiles Sableuses gris-vert à marmorisation rougeâtre et des sables feldspathiques vertes pales. Dans les secteurs de Guizengeard et de Clérac, la kaolinite est dominante à la base avec des traces de montmorillonite. La majeure partie renferme de 10 à 30 % d'illite et de 20 à 60 % de montmorillonite dans les secteurs de Baignes-Condéon (secteur nord du bassin des Charentes) et de Montreau-Blanzac.

Il est important de signaler la présence dans les sables de troncs fossilisés noirâtres localement très abondants. Leur étude confirme le climat tropical chaud et humide.

III.2.4. Epaisseur des dépôts

Les sédiments de tertiaires se sont déposés en discordance sur les calcaires du Campanien dans un environnement deltaïque. Ce phénomène de discordance est souligné par des produits d'altération des

calcaires. L'érosion et l'altération du calcaire jouent un rôle secondaire, mais assez important dans la constitution de paléotopographie.

Tableau III.2 Descriptions des formations tertiaires renfermant des dépôts argileux.

Etage	million d'années	Autre appellation	Formation	Description
Yprésien	48,6	Cuisien	Guizengard-inf. et Montroux	Constituée par une ou plusieurs séquences majeures de 10m de puissance environ, il s'agit des sables feldspathiques vert pâle, micacées avec quelques gravières à la base, surmontés par des argiles silteuses, par fois sableuse vert olive présentant des marbrures rougeâtres, subissant des actions pédogénétiques précoces en se déposant dans des vastes zones très calme.
		Sparnacien	Bernet	Des sables micacés fins d'aspect soufré, des graviers et des petits galets de quartz gris reprenant les argiles kaoliniques inférieures sous forme de galets mous. La puissance de ce dépôt est de l'ordre de 8 à 10m au sud, alors qu'il est nettement plus réduit au nord.
	55,9		Ramard et Touverac	Des sables fins argileux, gris clair, d'argiles blanches, ainsi que d'accumulations ligniteuses de 3 à 4m d'épaisseur à nombreux nodules de pyrite sur des argiles a nodules ferrugineux, liées à l'altération du toit du Crétacé Supérieur. Une à deux séquences sédimentaires y ont reconnues suivant les secteurs. Elle comporte des sables gris assez propres, renferment des troncs fossilisés noirâtres et des lentilles d'argiles kaoliniques blanches à grises. Ces lentilles hectométriques ont des épaisseurs variant de 0.5 à 7m. Une géométrie très perturbée à l'échelle des carrières avec des déformations post-sédimentaire importante

Cette topographie va être importante pour la formation des premiers dépôts sparnaciens. Au fur et à mesure du comblement du bassin la surface devient moins erratique. La répartition générale des dépôts argilo-sableux sur le substratum calcaire est conditionnée par l'existence des structures synclinales dans lesquelles les dépôts atteignent leur maximum d'épaisseur. La puissance des sédiments accumulés varie de quelques dizaines de mètres au nord, à plus de 250 m au sud.

Toutefois, les importantes déformations des premières couches sparnaciennes observées dans certaines carrières ne semblent pas dues à des contraintes tectoniques et ne peuvent pas être expliquée par de telles contraintes. Une partie de la déformation est probablement la conséquence d'une compaction différentielle des argiles et des corps gréseux (figure III.8).

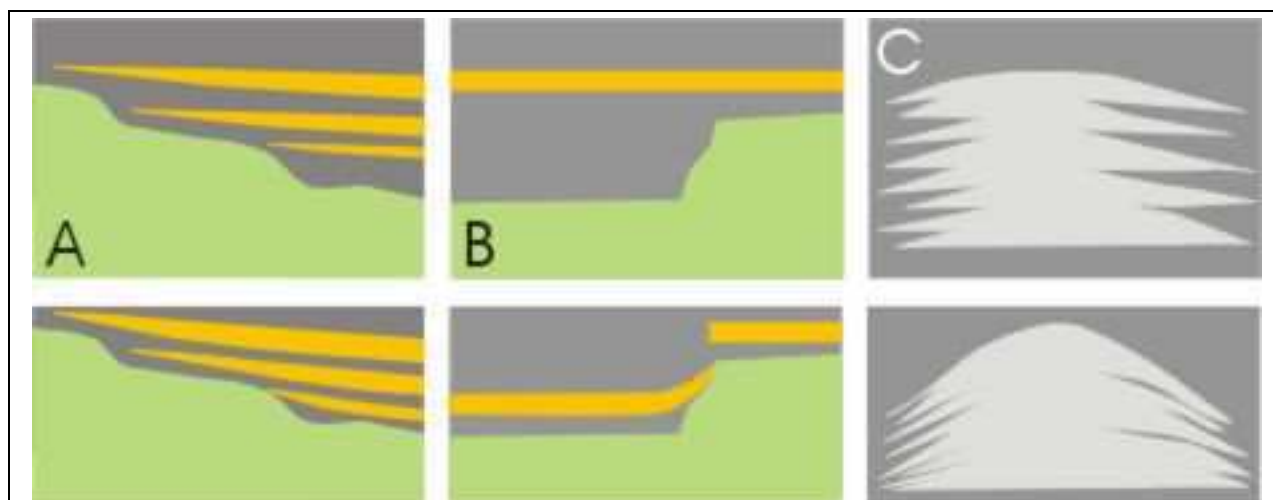
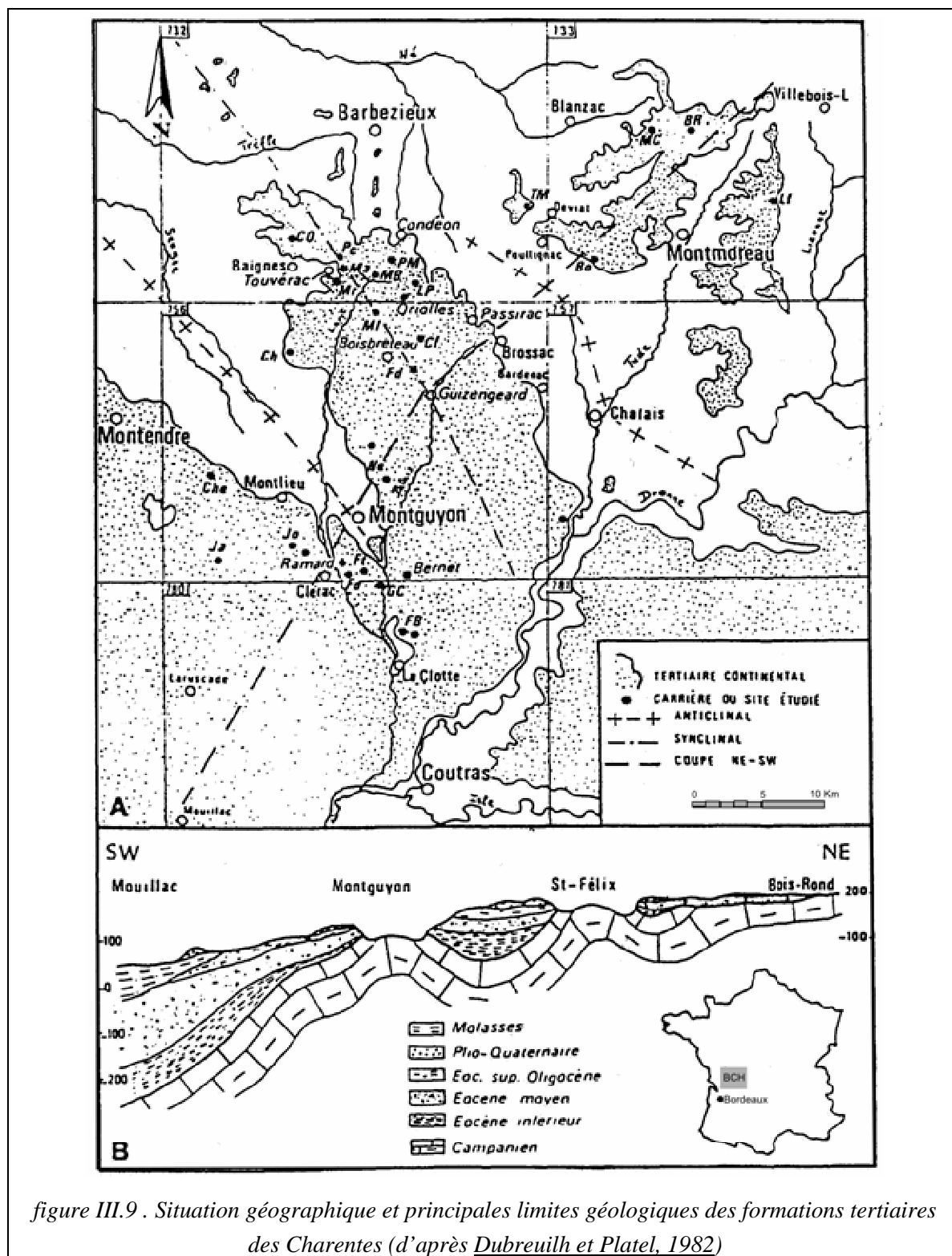


figure III.8 Effet de la compaction différentielle

Effet sur des corps gréseux (A), responsable d'un changement dans le pendage des unités ; sur un corps gréseux au-dessus d'une dénivelée (B), provoquant la formation d'une fausse faille synsédimentaire; sur des flancs d'un amas (C), modifiant le pendage des flancs et suggérant un faux relief synsédimentaire.

La forme en amas de certains gisements d'argiles kaoliniques est à mettre en relation avec soutirage karstique (voir figure IV.12). Ces amas remplis d'argiles sont centrées sur des zones de forte dépression au toit de calcaires et de géométrie plus ou moins fermée, mises en évidence par les sondages

serrés d'exploitation. Dubreuilh (1987) a constaté une liaison entre la présence d'argiles noires ligniteuses et pyriteuses et les dépressions karstiques du Périgord noir (Pombonne, Pagenal et la carrière du sauvage près de Fumel).



III.2.5. Les argiles hyperalumineuses

C'est la gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$ qui est responsable des teneurs élevées en aluminium. Ces argiles sont en général exemptes de quartz et de mica, et sont remarquablement pures (faibles teneurs en Fe et Ti). Elles contiennent en général une phase de kaolinite mieux ordonnée que la kaolinite environnante selon Delineau (1994).

Ce type d'argile a été décrit abondamment dans la littérature et observé dans des environnements différents du monde (Loughnan, 1978). Les appellations utilisées dans les différents pays traduisent l'aspect caractéristique de ces faciès : "flint clay" (argile à silex), "toasted clay" (argile grillée), "tonstein" (argile pierre), "beauxitic clay". Loughnan (1978) propose de les dénommer "clay rock facies", il donne la définition suivante : roche sédimentaire, anormalement indurée, constituée essentiellement de kaolinite avec seulement de faibles teneurs en mica et quartz, massive, ne présentant pas de lamination, à texture variable (oolithe, brèche, poudingue, ..) se présentant souvent en lits homogènes, continus de grande extension

Ces argiles sont observées en Charentes sous forme de nodules (8 à 10 cm de diamètre), blancs à gris, présentant une structure concentrique (teneur en gibbsite plus élevée au cœur) se séparant facilement du reste de la masse argileuse plus plastique. Ils deviennent très blancs après cuisson (Caillère et Jourdain, 1956). Selon Marchadour (1980), ces argiles sont fréquemment associées aux niveaux ligniteux ou aux sables pyriteux. Elles existent également sous forme de bancs massifs, indurés, très homogènes, de forte extension latérale et verticale jusqu'à 10 mètres), présentant une cassure chonchoïdale, et se découpant en blocs parallélépipédiques (Lanquine et Halm, 1951).

L'action des acides et des matières organiques a été reconnue comme responsable de la formation de gibbsite. Il y a donc circulation de solutions acides au sein d'un dépôt argileux déjà en place. Si tel est le cas, ces phénomènes de dissolution-recristallisation devraient recouper la stratigraphie. L'observation d'un tel profil d'altération n'est pas mentionnée jusqu'ici, on a au contraire souvent des niveaux massifs, continus de forte extension latérale.

Dans le cas des nodules à texture concentrique, et des niveaux à structure "poundinguiforme", il faut nécessairement envisager la reprise de matériaux déjà formés (Caillère et Jourdain, 1956; Kulbicki, 1956).

D'autres chercheurs ont attribué l'origine du kaolin de "semi-flint" à la floculation d'argile en présence d'eau de mer alcaline (Kesler 1956, Pickering et Hurst 1989, Dombrowski 1993).

La plus grosse concentration de ces argiles se trouve dans le secteur Centre (Guizengeard), cependant la présence de gibbsite est également constatée (localement) dans le secteur Sud mais avec des faciès argileux "normaux". Cela signifie que des phénomènes de dissolution recristallisation post-sédimentaires ont bien existé sur l'ensemble du bassin, même s'ils ne sont pas toujours suffisamment intenses pour se traduire par des faciès "pierreux" typiques

Selon Dubreuilh (1987), ces phénomènes sont principalement localisés dans la formation de Guizengeard inférieure (Cuisien), ils sont également observés dans les formations plus anciennes. Ils étaient absents dans la zone ancienne d'exploitation centrée sur Montguyon - Clérac

La zone principale d'exploitation était traditionnellement centrée sur ce secteur. Les résultats de prospection ont conduit à la découverte et à l'exploitation de gisements très importants d'argiles "hyperalumineuses" dans le Nord du bassin. L'utilisation de ces argiles pose un certain nombre de problèmes dans la mesure où leur comportement dans le circuit industriel est méconnu. C'est pourquoi une partie de cette étude a porté sur ces argiles.

III.3. Géométrie des dépôts de kaolin

Le bassin des Charentes renferme des gisements de différentes tailles et de différents types d'argiles. Pour contrôler les paramètres d'estimation, il est nécessaire d'avoir une bonne notion de la géométrie du gisement. Cette géométrie inclut la forme, l'isotropie, l'orientation et le pendage du gisement. La géométrie est utilisée comme un critère de classification. Delineau (1994) propose deux classes suivantes ;

1- Les gisements en boules : la partie exploitable de la lentille se trouve en fond de cuvette, et parfois sous une forme très profonde comme les puits comblés d'argile. La coupe d'un gisement est présentée dans la figure III.8 avec les différentes classes d'argile.

Exemple : Chez Arlot, Land de Pigeard.

2- Les gisements horizontaux : les couches argileuses sont très régulières avec une grande extension latérale. Exemple : Fontbouillant, Pas des Pierres, St Georges, BCH.

Cette classification est très générale. La formation d'une lentille argileuse est assimilable au comblement d'une cuvette. Les premières lentilles déposées subissent les non-conformités du substrat, tandis qu'au fur et à mesure du comblement, les dépôts se faisant sur une surface moins rugueuse deviennent plus réguliers. Dans ce cas, on aura un gisement mixte, composé d'une partie en boules (séquence inférieure) et de parties régulières (les séquences supérieures).

On distingue de plus des dépôts ayant une épaisseur très régulière, une grande extension latérale et pas de direction privilégiée, appelés de « type de nappe », comme le gisement de St Georges ; des lentilles chenalisées : l'extension est anisotrope, une dimension très petite dans la direction perpendiculaire au chenal et une grande dimension dans le sens du chenal. Epaisseur variée, parfois supérieure à 10 m ; dépôts appelés de « type chenalisé », comme le gisement de Grand Pas ; des lentilles massives sans structuration et normalement de petite taille, appelée de « type massif », comme le gisement de Jard.

L'avancement de la technologie et l'économie du travail à grande échelle permettent d'exploiter des gisements plus profonds, l'épaisseur de couverture de sable dans le gisement de BDR est entre 40 et 50 m, Ce genre de gisement est plus compliqué d'autant qu'on peut voir des lentilles continues et étendues dans la deuxième séquence, et en bas des lentilles chenalisées, surtout au Sud-ouest du gisement.

Les paramètres comme le positionnement des lentilles par rapport à la surface actuelle, le nombre de lentilles superposées, la relation entre les lentilles (distribution des lentilles dans l'espace d'estimation) méritent une attention particulière dans le processus d'évaluation et d'estimation où ces problèmes géométriques se superposent aux variations chimiques ou minéralogiques des argiles.

III.4. Classification des gisements de kaolin du bassin des Charentes

Une classification typologique du kaolin pourrait aider à gestion de destination d'usage du kaolin des Charentes.

L'étude de Yvon et al (1980) montre l'influence des défauts d'empilement (interstratification de feuillets potassiques) et des défauts dans le plan (a, b) (conséquence des substitutions de l'aluminium) sur les propriétés mécaniques des caoutchoucs chargés. Ils distinguent la répartition géographique de deux familles d'argile, en fonction de l'abondance et de la répartition des défauts structuraux. Yvon et al propose la classification des kaolins dans deux famille distingue présentées ci-après.

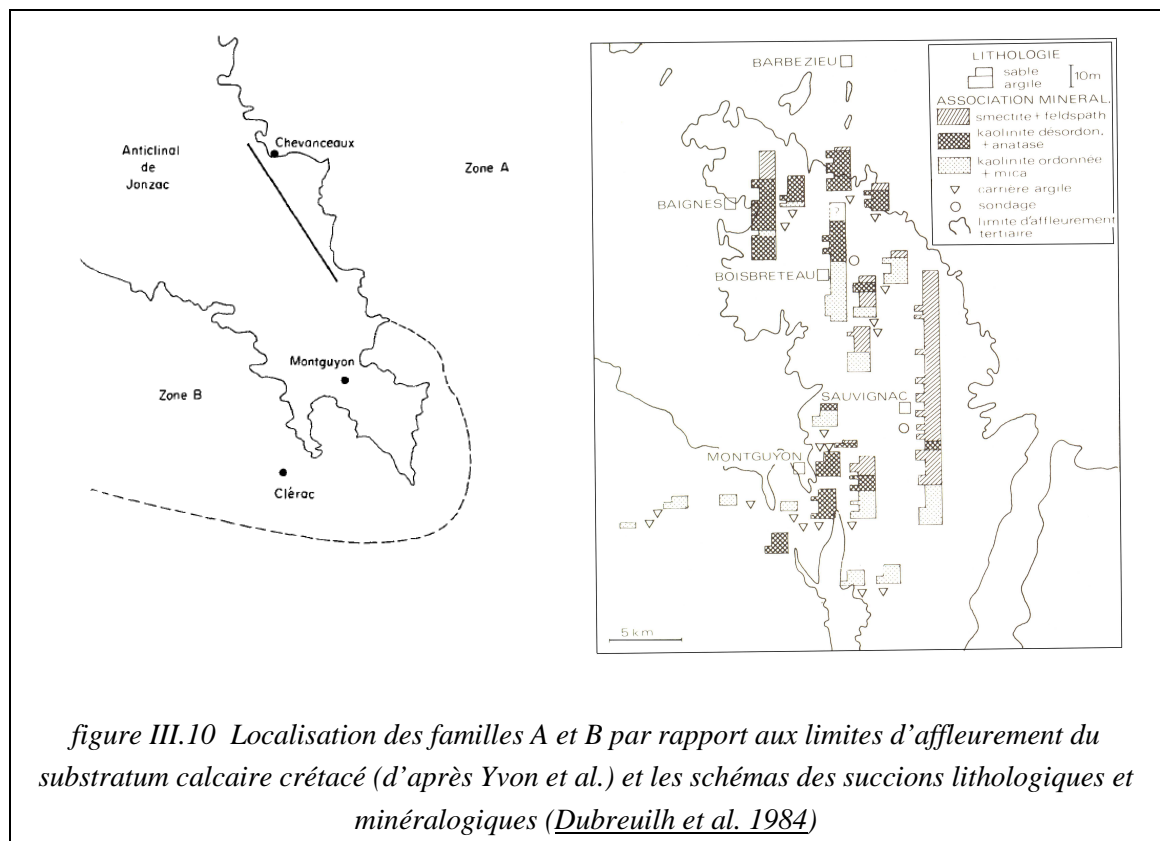
La première (famille A) contient des défauts liés à l'interstratification de feuillets micacés dans le kaolin et la quantité de défauts est liée positivement à la teneur en oxyde K_2O . On constate dans cette famille, que le nombre de fautes varie très peu selon la coupure granulométrique et les cristaux sont trapus et semblables.

La seconde (famille B) contient des défauts liés à la présence de fer (ou isomorphes du fer) dans la kaolinite, alors la corrélation entre la quantité de défauts et la teneur en oxyde K_2O est nulle (ou négative si les micas sont localisés dans les fractions grossières).

On a vu précédemment les trois classes proposées par Dubreuilh (1984), basées sur la cristallinité de la kaolinite et la présence de mica/anatase.

Garin (1982) pour sa part établi une typologie à partir de critères liés à l'utilisation des argiles : critère de taille comme la surface spécifique et la granulométrie, le comportement en suspension comme viscosité et la CEC, la minéralogie (plus appuyée par la présence du mica). Il propose 4 types présentés ci-après ;

- Alumineux : ayant 3 à 7% du mica, une viscosité faible (très abondants)
- Hyper-alumineux : l'absence du mica, viscosité très faible
- Micacés : mica très fréquent (>10%), viscosité élevée, (rare)
- Plastiques à tendance gélifiante : Viscosité très élevée, mica est absent



Delineau a essayé de trouver une correspondance entre ces classifications, mais il nous semble que cela ne peut pas être très fiable, vu les critères et les échantillons différents utilisés pour réaliser ces classifications.

L'étude en carrière montre différents critères macroscopiques (visuels) permettant de distinguer les argiles kaoliniques (et les gisements) des Charentes. Une typologie a été établie par Delineau à partir des principaux critères suivants :

- Composante "grise" de la couleur (qui traduit en partie la teneur en matières organiques) (teintes rouge ou orangée mises à part)
- Abondance de la pyrite (et son degré moyen d'oxydation)
- Teneur en mica

- Aspect et la texture : "pierreux", plastique, texture granuleuse ...
- Caractérisation générale en laboratoire confirme l'intérêt de ces critères, met en évidence d'autres paramètres permettant d'établir une typologie
- Taille (surface spécifique) et l'ordre structural le cortège des minéraux argileux à distance d'empilement supérieur à 10 A,
- Dispersabilité et les propriétés de coulabilité,
- Teneur en calcium,
- Teneur en fer, soufre et carbone.

Ces quatre types d'argiles distinguées par Delineau (1994) sont présentés dans le Tableau III.3. Le groupe I ("argiles hyperalumineuses") provient de la transformation diagénétiques (dissolution - recristallisation) des groupes II ou III, mais pas à priori du groupe IV (trop faibles teneurs en S et C) qui correspond à un dépôt nettement moins réducteur que les groupes I à III.

En général une carrière donnée contient un seul type d'argile mais ce n'est pas forcément toujours le cas (Landes du Placin, Bois de Gauraud).

Tableau III.3 Typologie des argiles kaoliniques des Charentes (Delineau 1994)

Type		(I)	(II)		(III)	(IV)
Classe		Argile pierreuse - hyper alumineuse	Argile plastique grise		argile blanche à mica Type "BCH-SGN"	argiles blanches à mica Type "LTP-LSB"
			IIa	IIb		
Utilisation		Chamotte	Chamotte		Céramique + (Charges)	Charges minérales
Coulabilité		Dispersion impossible	Mauvaise		Bonne en général	Passable
Composition	Mica	(-)	(+)	(++)	(+++)	(+++)
	Pyrite	(++++)	(+++)	(++)	(++)	(+) à (-)
	Carbone	(+++++) variable	(++++)	(+++)	(++)	(+) à (-)
	CaO en %	[0,10-0,16]	[0,10-0,20]		faible (<0,05)	0,10 en moyenne
	Minéral > 10 A	pas de smectite,	Smect.: peu ou pas, Interstratifié I/Chl		Smectite : rare Interstratifié I/Chl, Chlorite localement	Smectites Interstratifié I/Chl
Surface Spécifique (m2/g)		[18 - 24]	[28 – 751]	[20 - 30]	[16 -24]	[20 - 27]
Fer total lié <40 µm+ CBD		[0,3-0,6]	[0,7-1,1]	[1,1-1,5]	[1.2-1,5]	[1.6-2,5]
Stratigraphie		Non classifiable	Sparnacien		Cuisien inférieur ?	Cuisien Sup.
Associations minérales		Non classifiable	Kaolins désordonnés à anatase		Kaolins ordonnés à mica	Kaolins désordonnés à smectite et mica
Échantillons		PDP1 à 4 et PDP6 - LAP1 BDG1 et 7	FBT1-6 CHA1à4	LAP2à6 BDG	BCH3à7 -.SGN1à7	LTP1 à6 - LSB1à5 BDG2à6
Carrière type		PDP	FBT	LAP	BCH et SGN	LTP

III.5. Conclusion

La géologie des argiles kaoliniques du bassin des Charentes est connue depuis d'une cinquantaine d'année. Cette connaissance permet aux géologues d'AGS-Minéraux de diriger la prospection et choisir les zones les plus favorables à la présence de dépôts d'argiles kaoliniques.

Il nous paraît très important d'avoir une idée précise de la formation des kaolins à l'échelle des gisements des Charentes. L'étude de la genèse de ces gisements n'entrait pas dans le cadre de ce travail, mais du fait de son importance pour l'interprétation des résultats de l'étude statistique et des calculs géostatistiques, on a essayé de mieux l'approcher à travers des études bibliographiques sur des gisements similaires.

IV. ANALYSES STATISTIQUES DES DONNEES DE SONDAGES DU BASSIN DES CHARENTES

L'exploitation des gisements anciens par la méthode actuelle ne posait pas des problèmes importants. Dans les gisements actuels, on se trouve de plus en plus souvent face à des produits qui n'ont pas la qualité attendue. Dans ce chapitre on aura recours aux outils statistiques pour mettre en évidence les différences existant entre ces gisements.

On abordera d'abord la méthode d'échantillonnage. Une étude critique de cette méthode permet d'étudier la fiabilité des données. Ces dernières seront utilisées selon la méthode d'estimation proposée dans le chapitre V.

On présentera ensuite la variabilité des critères visuels ; la minéralogie des kaolins des Charentes sera également évoquée car, la connaissance minéralogique des argiles sera utilisée pour interpréter les résultats de l'analyse statistique.

Compte tenu de leur utilisation pour choisir les échantillons et pour la définition des zones plus ou moins homogènes, les critères macroscopiques (représentés par les codes lithologiques) sont pris en compte dans les études statistiques.

Une des sources du problème posé par la société AGS-Minéraux peut sans doute se trouver dans la variation de la composition minéralogique des argiles kaoliniques. Néanmoins l'analyse statistique est faite sur les données des mesures chimiques, car

- d'une part, les mesures de la composition minéralogique ne sont pas disponibles et donc le calcul modal de la composition minéralogique en utilisant ces mesures ne peut pas être précis,
- d'autre part les décisions de la production (depuis la classifications des réserves d'argiles jusqu'aux contrôles sur les produits commerciaux) sont basées sur les mesures de la composition chimique.
- Les études réalisées dans ce chapitre ont pour but de comprendre :
 - La variation des données dans les gisements et la comparaison entre les gisements
 - La relation entre les codes lithologiques et la composition chimique
 - La relation entre ces variables et leurs interprétations minéralogiques
 - La différence entre les gisements en exploitation et les anciens gisements

IV.1. Sondages et acquisition des données

Pour une étude géostatistique, la qualité des informations fournies est un critère fondamental tant en terme de teneur qu'en terme de positionnement géographique. Avant de commencer l'analyse statistique, on présente ici le processus d'acquisition des données.

IV.1.1. Prospection et maille de sondage

Les données de sondage sont les références servant à la prise de décision d'exploitation actuelle. AGS possède une base des données Access utilisée par le logiciel de CORALIS, dans laquelle sont archivés tous les paramètres lithologiques des carottes et les analyses chimiques des échantillons. C'est cette base de données qui sera utilisée dans cette étude.

L'opération de prospection chez AGS commence par une série de profils de sondage selon une direction perpendiculaire à l'extension du bassin (les profils sont quasiment E-W). Si les résultats sont intéressants dans quelques sondages, on engage une deuxième phase de sondages en réduisant la dimension de la maille. Le Tableau IV.1 donne les dimensions des mailles selon la phase de prospection

Tableau IV.1 Taille des mailles de sondage selon la phase de prospection

Type	Stratégique			Technique				
Phase	1	2	3	1	2	3	4	5
Maille (m)	160	113	80	56.5	40	28	20	10
Rapport de largeur	8	5.6	4	2.8	2	1.4	1	0.5
Rapport de la surface	64	32	16	8	4	2	1	0.25

Le plus souvent il n'est pas possible à l'étape de la prospection de faire le sondage exactement sur le point souhaité, donc le point le plus proche est choisi et ce point est relevé sur le terrain par GPS.

Dans cette étape il n'est pas nécessaire que tous les points de sondage soient exactement alignés et à égale distance. Cependant des erreurs sur les coordonnées conduisent à des problèmes, tels que des erreurs de pendage ou des discontinuités apparentes non explicables par les règles géologiques normales.

Actuellement, il y a deux équipes de sondeurs chez AGS. Chaque équipe a deux systèmes logistiques, le premier camion est équipé avec le système de sondage et le deuxième est là pour le service de l'eau nécessaire pour le sondage, pour apporter les tiges de forage, etc. (figure IV.1).

IV.1.2. Carottage

Le système traditionnel de forage était la « tarière » (auger). Ce système est destructif. La position exacte des niveaux géologiques n'est donc pas définie correctement, l'échantillon étant un mélange de différents niveaux. Le système utilisé actuellement pour l'acquisition des échantillons est le carottage avec un carottier d'une capacité de 1.5 m d'échantillon qu'on peut remonter à la surface par un extracteur lié à un câble (figure IV.2).

Pour le forage dans les couches sableuses et argileuses, la couronne est à carbure de tungstène et pour les sondages dans les grisons (conglomérats cimentés par argile) ou le calcaire, la couronne est diamantée. Grâce à l'abrasivité basse de l'argile et la cimentation très faible des sables, la consommation de couronnes est très faible, mais parfois l'existence de galets entre les couches sableuses pose quelques problèmes comme la cassure des segments ou de la couronne.



figure IV.1 Equipe de sondage ; le camion du système sondeuse et le camion de support

La vitesse du forage dans les sables est assez rapide, un avancement proche de 0.5 m/mn est normal. Dans les sables non cimentés, on ne peut pas récupérer de carotte. L'échantillonnage du sable se fait par les débris sortis par l'eau pompée dans la tige de sondage. On les récupère avec une pelle dans un trou prévu près du sondage, et on le met dans un crible de laboratoire pour la séparation de l'eau (figure IV.3).



figure IV.2 Un paramètre important dans l'estimation, est la situation spatiale de l'échantillon. Sur cette photo, on observe une carotte quasiment complète (1.5 m) qui est récupérée à la suite du passage d'une séquence sableuse (pas d'échantillon carotté).

La vitesse d'avancement de la couronne baisse quand elle arrive aux couches argileuses ou de sable argileux. Ce changement de vitesse du sondage est un guide pour le sondeur, il indique la profondeur de la couche argileuse. Pour prendre un bon échantillon, il est nécessaire de baisser la pression hydraulique du système, pour limiter les perturbations physiques.

A la fin de chaque cycle de carottage, il est nécessaire d'augmenter la pression pour créer un bouchon empêchant la carotte de tomber pendant la sortie du carottier. Bien sûr, cette action perturbera la possibilité d'études exactes de la carotte, sur 10 à 15 cm (à la fin et au début), du fait de la déformation de l'échantillon.

La procédure d'analyse est déterminée à partir de l'affectation de codes par le sondeur. Après cette affectation, il y a deux types de contrôle :

Contrôle de qualité d'argile pour attribuer un code AGS aux carottes prélevées par le sondeur et considérées comme des échantillons argileux (bons pour extraction selon la classification AGS).

Contrôle effectué sur les caisses des carottes classifiées non argileuses. Une fiche de synthèse sur le log des carottes est alors remplie pour contrôler et compléter le rapport du sondeur. Si on confirme la classification de la carotte avec des codes « non-AGS », on ne conduira sur elle aucune analyse.



figure IV.3 Mise en caisse des carottes des sondages de prospection, pour étude géologique.
Les sables sont échantillonnés à partir du fluide de forage (en sac plastique). Pour les sondages d'évaluation seuls les échantillons jugés comme kaolin commercial seront mise en caisse.

IV.1.3. Description lithologique du sondage et codage des échantillons

D'importantes variations pétrographiques, minéralogiques ou lithologiques se manifestent tant à l'échelle du bassin qu'à celle des gisements. L'étude de ces variations permet d'établir un classement qualitatif des argiles et ce classement va jouer un rôle important pour l'exploitation car il va servir de base à la sélection. Il va s'agir ici essentiellement de critères macroscopiques.

IV.1.3.1. Couleur

Les principales causes de coloration sont : la présence d'oxydes ou hydroxydes de fer, les matières organiques (fossiles) et la pyrite. Le taux d'humidité peut être important sur l'appréciation de la teinte des échantillons bruts (avant séchage). Certaines argiles d'un gris clair à l'ouverture du front de taille deviennent très blanches, ce critère de variation de teinte doit être pris en compte pour la description.

Pour la description des échantillons carottés, les sondeurs utilisent un code composé de deux chiffres (Tableau IV.2), le premier chiffre est un indice de couleur (1 à 9 pour blanc, jaune, gris, rose, vert, bleu, rouge, marron et noir) et le deuxième chiffre caractérise l'intensité de la teinte (0 à 3 pour indéfinie, claire, neutre et foncée). La mesure de la blancheur ne se fait pas sur tous les échantillons.

La teneur et la composition de la matière organique sont deux facteurs très importants définissant la couleur des argiles kaoliniques des Charentes, Les matières organiques donnent une teinte allant du gris clair au marron-noir en passant par le bleu foncé. La répartition des matières organiques est souvent hétérogène au sein d'un gisement comme à plus petite échelle donnant par exemple des "tâches" aux formes irrégulières

Tableau IV.2. Codes des lithofaciès du bassin des Charentes et code de la couleur des argiles kaoliniques

Lithofaciès				Couleur		Teinte	
Code	Faciès	Code	Faciès	Code	Coul.	Code	Teinte
00	Hors litho	80	Galets	1	Blanc	0	Indéfinie
01	Stériles 1	81	Graviers	2	Jaune	1	Clair
02	Stériles 2	82	Sable grossier	3	Gris	2	Neutre
08	Argiles	83	Sable fin	4	Rose	3	Foncé
10	Argile très maigre	84	Sable peu argileux	5	Vert		
11	Argile maigre	85	Sable argileux	6	Bleu		
12	Argile ½ Grasse à Grain	86	Argile sableuse	7	Rouge		
13	Argile ½ Grasse	87	Argile déclassée	8	Marron		
14	Argile Grasse à Grain	90	Calcaire massif	9	Noir		
15	Argile Grasse	91	C. tendre ou reman.	Exemple			
16	Argile ligniteuse	92	Sable Calcaire	11			Blanc clair
17	Argile pierreuse	93	Sable argil. calc.	52			Rose neutre
71	Indurations	94	Argile à calc.	73			Rouge foncé
72	Grisons	95	Argiles versicolores	32			Gris neutre

Selon l'observation sur les carrières, les oxydes ou hydroxydes de fer peuvent être présents sous les formes suivantes :

- nodules centimétriques
- tâches ou auréoles localisées "rouille millimétriques à centimétriques"
- "lits" de colorations orangés (oxydes de fer) liées à l'existence d'une zone de battement de nappe

Il est probable que chaque type de colorations a une origine différente (Delineau 1994).

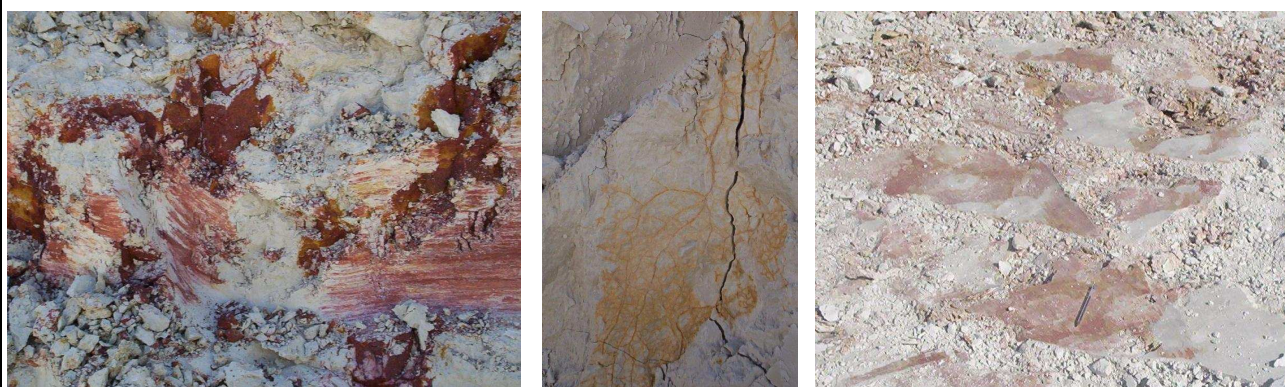


figure IV.4 Différentes colorations du kaolin par les oxydes de fer

IV.1.3.2. Minéraux visibles :

La pyrite (mélange de sulfures de fer où la pyrite domine) se trouve sous différentes formes dans les gisements charentais. Delineau l'a observé en petits cubes millimétriques dans la carrière Fontbouillant, mais il cite aussi la présence de pyrite en nodules de plusieurs kilogrammes. La pyrite sous forme de gros grains est très fréquente dans les argiles pierreuses. Les traces noires de matières

organiques peuvent être confondues avec la pyrite dans la description des sondeurs. La figure IV.5 montre des nodules de pyrite observés dans la carrière de Grand Pas et de la carrière du Maudet.



Selon les observations de Delineau, on peut avoir de véritables horizons de plusieurs dizaines de mètres d'extension latérale et d'épaisseur centimétrique à décimétrique qui recouvre (et) ou se trouve intercalé entre les niveaux d'argile. Cette tendance de la pyrite à la ségrégation par rapport aux niveaux argileux pose un problème d'échantillonnage.

L'observation macroscopique des argiles en place dans la carrière est nécessaire pour bien rendre compte l'abondance de la pyrite. L'abondance de la pyrite varie selon les carrières. La présence de pyrite dans l'argile mérite d'être mentionnée, car si à priori il est facile de séparer la pyrite de taille macroscopique des argiles, les grains plus petits ou les éclats qui sont susceptibles de rester dans l'argile, se retrouvent sous forme de points noirs dans les boudins de chamotte.

D'autre part, l'altération de la pyrite conduit à la formation d'oxydes et hydroxydes de fer qui vont colorer l'argile. La répartition de la pyrite en phases macroscopiques distinctes (grains ou nodules) induit la distribution d'une partie des oxydes de fer, et doit donc à priori faciliter la sélection des argiles exemptes de coloration. Des auréoles colorées peuvent être formés par l'altération de ces nodules. Les pyrites très dispersées dans les argiles peuvent produire une coloration plus vaste.

Le quartz est en général infra millimétrique, son abondance et sa finesse varient dans les gisements, sa présence peut être estimée par des tests simples comme le passage d'une lame de couteau sur la surface de l'échantillon. Le bruit de cette action, les traces de rayure sur la surface (leur abondance et leur taille), et la continuité des "rognures" d'argiles sont les critères qui permettent de quantifier la quantité et la forme du quartz.

Les appellations "grasse" et "maigre" utilisées par l'exploitant lors de la prospection traduisent respectivement l'absence ou l'abondance de quartz (Tableau IV.3). L'évolution de ces critères est importante du point de vue sédimentologie, une augmentation de la teneur en quartz traduit un milieu de sédimentation de plus forte énergie. Les variations de teneur en quartz, montrent un changement du milieu de sédimentation, qui aura des effets sur d'autres critères (couleur ...) permettant ainsi de distinguer des structures sédimentaires (petites lentilles) au sein de la lentille principale constituée par la carrière.

Les micas sont perceptibles à la lumière, on peut même voir les plus grossiers à la loupe. L'étude en microscopie électronique montre qu'ils correspondent à une illite riche en Mg le nom de Phengite a été proposé par Deer et al. (1966) pour ce type de mica.

IV.1.3.3. Aspect

Les kaolins présentent des textures et des structures variées : aspect de la cassure, structures massives ou laminaire, etc.

La cassure des argiles pierreuses est conchoïdale (figure IV.7.b) mais se présentent sous des faciès variés qui sont à l'origine de diverses appellations utilisées par les sondeurs, Delineau cite les appellations utilisées dans la carrière Pas des Pierres ; qui sont sèche blanche dure, sèche blanche friable, et sèche pierreuse.

Si les argiles pierreuses sont des argiles hyperalumineuses, les argiles hyperalumineuses peuvent se rencontrer sous d'autres faciès, grasse blanche, grasse brune, etc. et sont alors classées, à tort, comme des argiles grasses ordinaires (code 15 ; voir Tableau IV.3).

Du point de vue rhéologique, les argiles peuvent être classifiées comme argile plastique ou argile non-plastique. Les argiles pierreuses se dispersent très mal dans l'eau. La plasticité du kaolin est liée à la présence de quartz et de mica et d'argiles smectites, Delineau a mis en évidence le rôle des smectites sur la qualité rhéologique des kaolins des Charentes.

IV.1.3.4. Éléments figurés

Les nodules sont les figures les plus fréquentes dans les argiles kaoliniques. On observe par exemple des nodules argileux clairs qui sont enrichis en gibbsite (figure IV.6), des nodules argileux bleu foncé qui sont plus riches en Fer. Les traces de matières organiques, sont repérables grâce à leur structure ligneuse bleue foncée à noire ou à l'aspect de feuilles décomposées noires. Les matières organiques sont souvent extrêmes fines et complètement mélangées à la matrice argileuse ce qui rend leur détection très difficile.

On connaît d'autre part des éléments centimétriques d'argile claire qui contiennent une phase argileuse différente de la kaolinite environnante, ces éléments sont connus sous titre de "galets mous".

Les pistes de ver et les chenaux de circulation des fluides sont moins cités dans les bibliographies sur les argiles kaoliniques des Charentes.

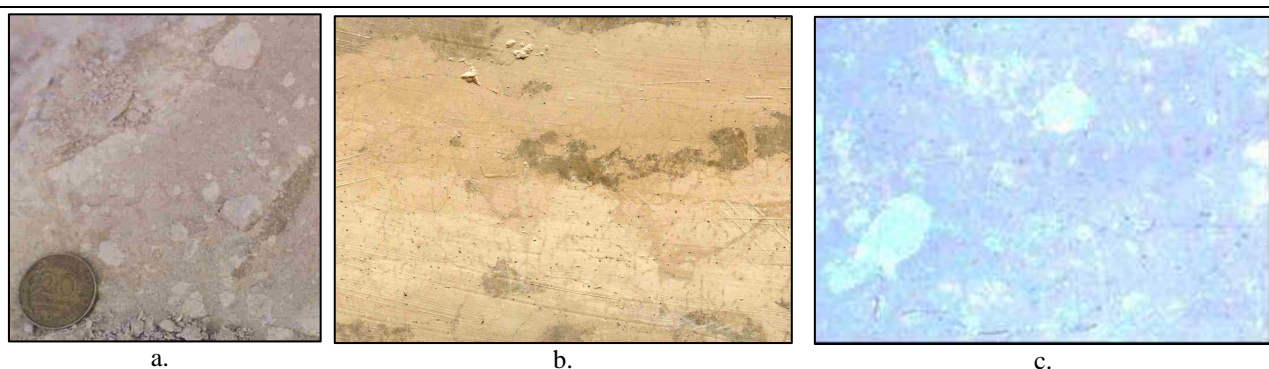


figure IV.6 Quelques exemples d'éléments figurés

Nodules blancs dans l'argile sèche pierreuse de la carrière BDG (a) (Delineau 1994), - structuration en chenaux et zones blanchies avec des traînées vertes (b) - nodules blancs ou crèmes composés d'une argile différentes dans le sondage 5910 de la carrière de Bois Des Rentes(c).

Une fois recueillies les carottes, une description lithologique succincte en est faite selon une classification mise au point par l'entreprise. Cette classification aboutit à un code qui figure dans le Tableau IV.3. Les faciès lithologiques sont présentés d'une manière descriptive. Les codes et la dénomination ne correspondent pas nécessairement aux définitions classiques, mais cette classification a été faite par l'entreprise en tenant compte de la variation et des critères locaux.



a.



b.

figure IV.7 Rognure continue et assez grande d'une argile grasse (a), la cassure conchoïdale et l'apparence compacte d'une argile pierreuse (b).

Tableau IV.3 Description lithologique des codes des lithofaciès du Bassin des Charentes

Code	FACIES	Description	Analyse/ Al_2O_3 attendue (%)
10	Argile très maigre	Argile kaolinique qui contient des sables, on entend le bruit du sable en grattant la carotte au couteau, on voit les grains de sable	Pour certain $<30\% Al_2O_3$ PF et T40 et suivant le résultat une chimie
11	Argile maigre	Argile kaolinique qui contient des grains très fins de sables, on entend le bruit du sable en grattant la carotte, la surface grattée n'est pas lisse	Oui $\sim 30\% Al_2O_3$
12	Argile ½ Grasse à Grain	Argile kaolinique qui contient des grains très fins de sables, on entend moins, le bruit du sable en grattant la carotte, la surface grattée est plus lisse	Oui $\sim 34\% Al_2O_3$
13	Argile ½ Grasse	Argile kaolinique exempte de sable, la surface grattée est lisse, mais on a de petites rognures (teneur moyenne d' Al_2O_3)	Oui $\sim 37\% Al_2O_3$
14	Argile Grasse à Grain	Argile kaolinique qui contient très peu de sable, les grains laisse des rayures sur la surface grattée, en le grattant on a de rognures plus grandes, les petites plaque mica brillant à la lumière sont visibles	Oui $\sim 40\% Al_2O_3$
15	Argile Grasse	Argile kaolinique exempte de sable, en la grattant on a des rognures plus grandes, la surface gratté est très lisse, de petites plaque mica brillant dans la lumière sont visibles	Oui $\sim 42\% Al_2O_3$
16	Argile ligniteuse	Argile que contient une quantité des matières organiques, qui se manifeste par la couleur noire ou brune.	NON Ponctuellement PF
17	Argile pierreuse	Argile kaolinique exempte de sable, la densité de l'argile et sa compacité sont élevées, on le sent en tapant le couteau sur la carotte, parfois on voit dedans des nodules	Oui $>44\% Al_2O_3$

Tableau IV.3.suite. Description lithologique des codes des lithofaciès du Bassin des Charentes

Code	FACIES	Description	Analyse/ Al_2O_3 attendue (%)
00	Hors litho	Stérile, sable de couverture, inconnu, cavité, etc. ... (tous faciès non classés)	Non
01	Stériles 1	sable de couverture (sable de Périgord) tous matériaux de recouvrement au dessus du toit de l'exploitation	Non
02	Stériles 2	sable de couverture (sable de Périgord) matériaux stériles au dessous du toit de l'exploitation.	Non
08	Argiles	Argile verte (contient des smectites) toutes argiles confondues (du 17 au 85)	Non (aléatoire)
71	Indurations	Conglomérat cimenté par argile	Non
72	Grisons	Conglomérat cimenté par argile	Non
80	Galets	Sédiment avec de gros grains plus de 2mm.arrondis	Non
81	Graviers	Sédiment avec des grains entre 1mm et 2mm.anguleux	Non
82	Sable grossier	Sédiment avec des grains entre 0.02 mm et 1mm	Non
83	Sable fin	Sédiment avec des petits grains entre 0.002 mm et 0.02mm	Non
84	Sable peu argileux	Sable qui contient jusqu'à 30% d'argile	Non
85	Sable argileux	Sable qui contient entre 30 et 70% d'argile	Non
86	Argile sableuse	Argile qui contient jusqu'à 30% de sable	Non
87	Argile déclassée	Argile très colorée par la présence des oxydes de fer ou de titane	Non
90	Calcaire massif	Socle massif	Non
91	Calcaire tendre/remanié	Calcaire tendre ou remanier	Non
92	Sable et calcaire	Sable contenant des carbonates	Non
93	Sable argile calcaire.	Sable contenant de l'argile et des carbonates	Non
94	Argile /éléments calcaire	Argile avec des éléments carbonatés	Non
95	Argile versicolore.	Idem argiles déclassées mais à la base des dépôts tertiaires	Non

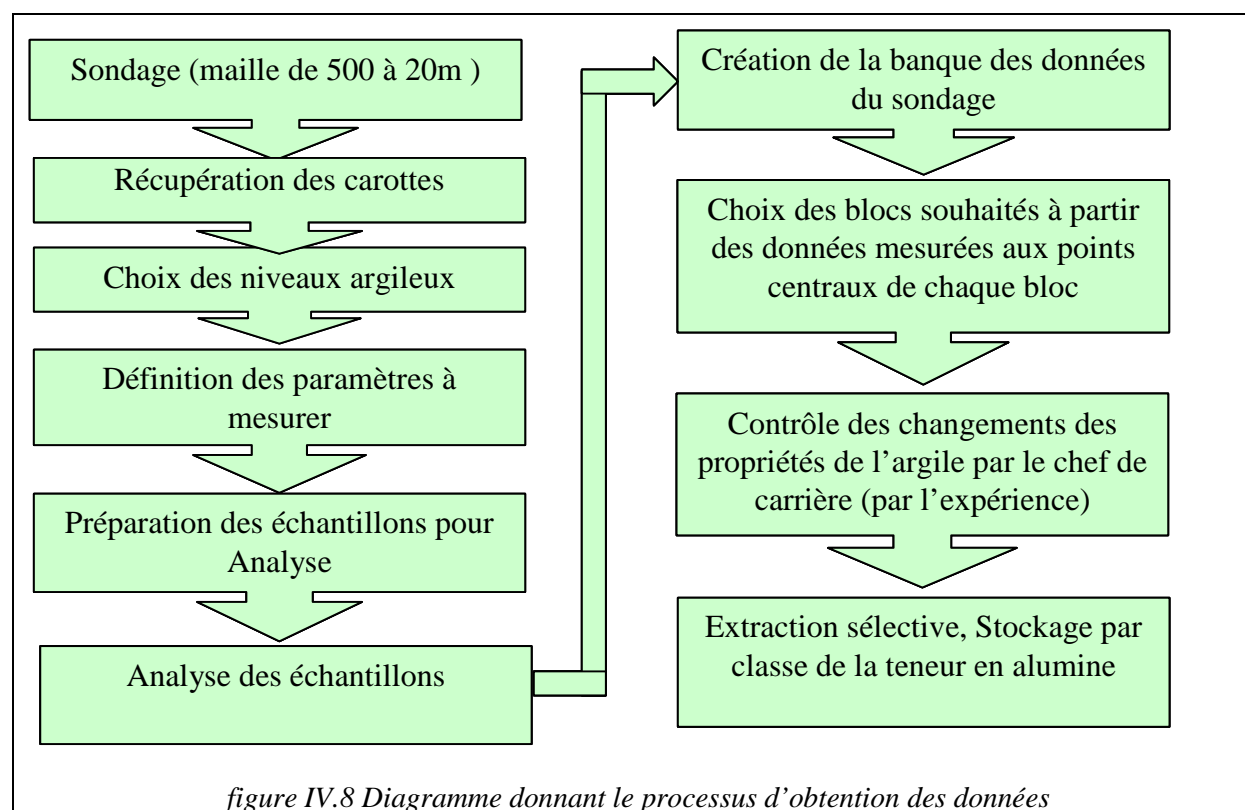
La présence du quartz et la taille de ces grains sont contrôlés par l'observation visuelle et le test au couteau. C'est la méthode traditionnelle pour tester l'argile : si l'argile est riche en sable, en grattant, on entend le bruit du sable. Une faible présence de sable laisse les traces de rayure sur la surface lisse grattée par le couteau. Si l'échantillon a du sable très fin, on a de petites "rognures". Les argiles kaoliniques très pures, exemptes de quartz et de gibbsite, ont un aspect très doux et les "rognures" sont assez grandes (figure IV.7.a). L'argile pierreuse est très dure et dense d'où son appellation (figure IV.7.b).

Les argiles kaoliniques de qualité industrielle sont codées de 11 à 17. L'argile ligniteuse est définie par code 16, cette argile n'a pas d'intérêt économique, mais comme on a vu dans le modèle des kaolins de Géorgie, ces matières organiques ont joué un rôle important dans la formation du kaolin industriel. Ce modèle peut être valable pour les argiles des Charentes en supposant une boue d'argile relativement riche en matière organique. Le critère le plus important pour la classification lithologique des argiles des Charentes est la présence des impuretés grossières.

C'est sur cette base que s'effectue la sélection des échantillons, par exemple pour une argile demie grasse (code 13 ; voir Tableau IV.3), on attend une teneur en Al_2O_3 d'environ 37 % (sur l'échantillon cuit). La précision du critère "code lithologique" pour présenter la composition chimique et son évolution d'un gisement à l'autre est discutée plus loin.

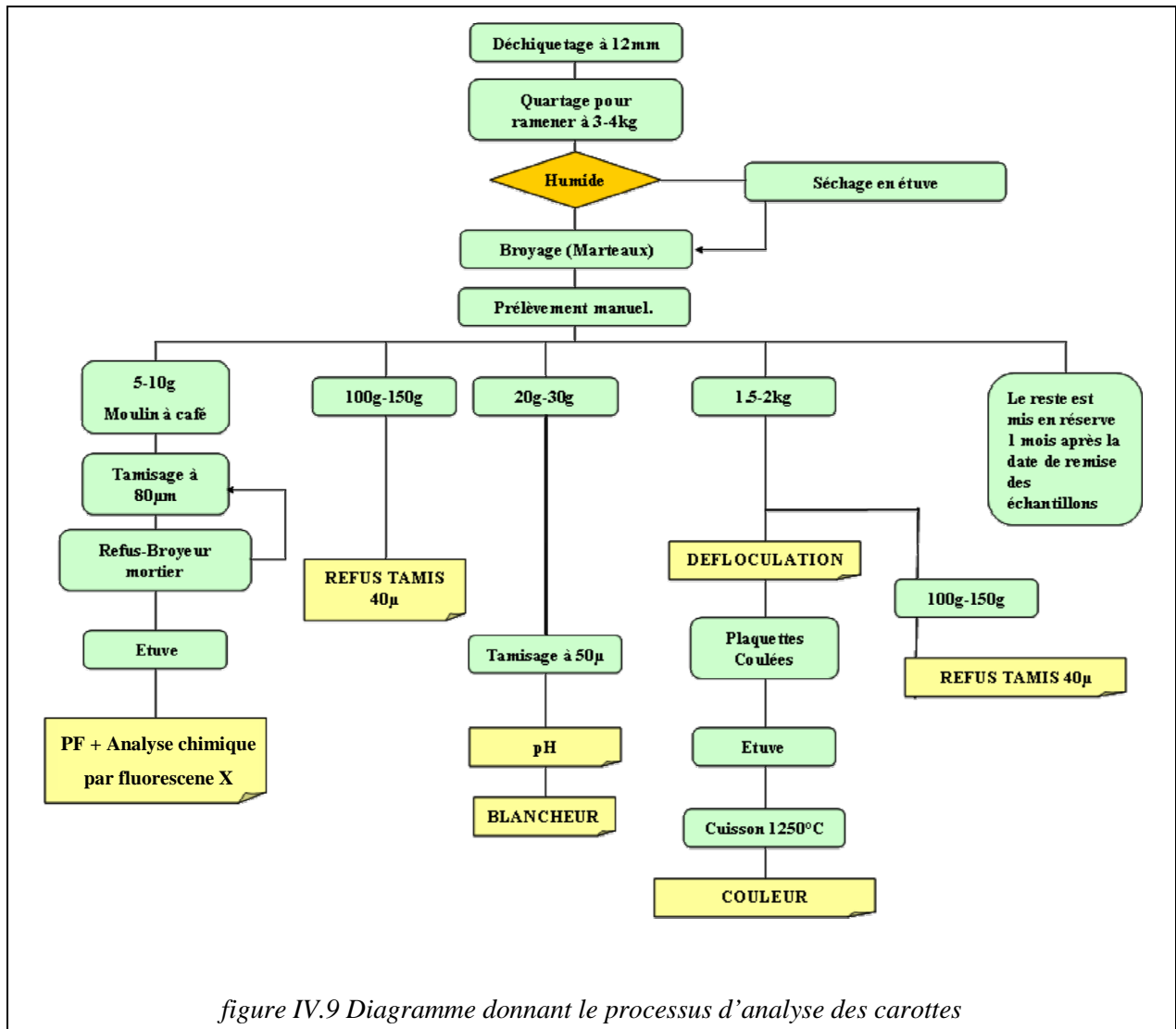
IV.1.4. Préparation et analyse des échantillons

La figure IV.8 présente le schéma général de l'échantillonnage et le choix d'analyse. Les seuls échantillons analysés sont des kaolins ayant une teneur haute en Al_2O_3 (au minimum 30%) avec une couleur acceptable : ni rouge (présence d'oxydes de fer), ni jaune (présence d'hydroxydes de fer) ni noir ou brun (quantité importante de matière organique, principalement de lignite).



En revanche, des valeurs par défaut sont utilisées pour remplacer les données sans analyse dans le calcul des réserves d'argile. Les valeurs par défaut seront remplacées, de façon appropriée, par des codes géologiques et indice de couleur. Le tableau des valeurs ne contient pas les valeurs par défaut de tous les éléments et tous les faciès, les valeurs sont réglées d'un gisement à l'autre en tenant compte du type de gisement et de la ressemblance à un gisement déjà exploité, en tenant compte de l'analyse chimique des couches classifiées, comme « argile AGS ».

La *figure IV.9* montre le diagramme d'analyse des échantillons carottés. Les éléments dosés (présentés sous forme d'oxyde) sont les suivants ; Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O , Na_2O , CaO , MgO et P_2O_5 . Depuis peu AGS dose également le soufre et le carbone dans les échantillons. Cela permet d'estimer la présence de pyrite et des matières organiques.



IV.1.5. Problèmes d'échantillonnage

La taille des échantillons varie en fonction de la variation des critères visuels (code lithologique, couleur etc.), les segments jugés homogènes par ces critères seront pris comme un échantillon unique dont la longueur est un multiple de 0.5 m (le minimum de la précision de niveau d'extraction) avec un maximum actuellement à 2 m. Comme on verra plus tard, cette façon d'échantillonner pose certains problèmes pour le traitement statistique et géostatistique des données, et l'extraction de l'argile.

Il faut toujours accepter d'avoir quelques limitations techniques. Par exemple il n'est pas très pratique de contrôler à chaque pas d'avancement d'un forage la présence ou non de la carotte dans le carottier. Ou encore, comme indiqué précédemment, pour empêcher la carotte de tomber pendant la remontée du carottier, il est nécessaire de faire un bouchon d'argile au début du carottier. Cette partie d'échantillon ne sera pas représentative des terrains. A ce moment là, on aura une déformation significative de la carotte. En particulier, quand le carottier est complètement rempli par la carotte, cette déformation sera très marquée à la fin du carottier ou dans les parties de carotte qui ont une épaisseur inférieure au diamètre intérieur du carottier.

Bien sûr, l'erreur sur l'estimation de la position augmente quand il y a assemblage de plusieurs carottes. Cette erreur se produit par exemple quand il y a une alternance de matières non récupérées (les sables) et de matières récupérées (l'argile, l'argile sableuse et le sable argileux).

La surestimation ou la sous-estimation sont des phénomènes courants dans ce cas là. On appliquera donc deux principes très importants dans le calcul de l'estimation et spécialement pour les techniques de la géostatistique. Ces deux principes sont :

- le positionnement juste et précis des échantillons,
- l'analyse juste et précise des teneurs pour chaque échantillon

Un problème est celui de la représentativité de l'échantillon carotté, par rapport à la réalité du terrain. Les phénomènes très locaux comme les fentes de dessiccation remplis par du sable (figure 2.12.a) ou une coloration par oxydation des nodules de pyrite peuvent mettre en question la représentabilité de l'échantillon. La présence d'un nodule centimétrique de pyrite dans une carotte augmente considérablement la teneur mesurée de l'échantillon.

Les phénomènes naturels sont en général continus, et les passages brutaux sont très rares. L'exemple de l'analyse de chaque demi-mètre de carotte du sondage S5.05910 confirme qu'il y a une variation de la teneur à l'intérieur des segments longs échantillonnés (figure IV.10). Cette étude a été réalisée après l'observation d'écart important de la teneur entre des échantillons très proches.

Pour mieux définir la zone du sud-ouest du gisement BDR, AGS a effectué une série de sondages successifs (en 3 ou 4 étapes de 3m) sur une maille de 10 m. Les sondages de chaque étape ne sont pas exactement calés sur la position de l'étape précédente et tous ont été enregistrés individuellement. Cela produit des zones de chevauchement ou de manque.

On dispose donc de la possibilité de comparer les échantillons pris sur le même niveau kaolinique à une faible distance, le seul facteur qui empêche une comparaison parfaite, c'est le fait que les carottes n'ont pas été coupées exactement aux mêmes cotes. On compare donc ici, les composites des segments communs. Pour chaque composite, on calcule la moyenne pondérée des segments (par la portion de la longueur de l'échantillon qui est dans le composite). Le Tableau IV.4 montre un résumé de cette comparaison, la différence entre les teneurs des composites peut être expliquée de différentes façons :

- Premièrement, une variabilité horizontale. Celle-ci ne peut toutefois expliquer qu'une faible différence entre les teneurs, sauf dans le cas où l'on serait situé sur une frontière proche d'un changement brutal de faciès.
- Deuxièmement, la variabilité ponctuelle, au sein de l'échantillon. Les échantillons (assimilés à des segments) ne sont pas très homogènes. Cela veut dire qu'on a une différence importante entre la teneur mesurée de l'échantillon et la teneur de la partie d'échantillon ayant participé au calcul du composite, ce qui va à l'encontre de l'hypothèse d'homogénéité (faible variation) de la teneur dans un segment qualifié avec un code d'argile donné. Si cela est vrai, la méthode d'échantillonnage basée sur l'hypothèse de l'homogénéité à l'intérieur d'un segment (présenté par une description lithologique définie) est difficilement recevable.
- Enfin, une troisième hypothèse, consiste à rechercher l'origine de cette différence, dans l'erreur sur les valeurs mesurées (rappel $\epsilon_{\text{totale}} = \epsilon_{\text{Echantillonnage}} + \epsilon_{\text{Préparation}} + \epsilon_{\text{Analyse}}$). On ne dispose pas d'échantillons tests pour examiner si les résultats sont redondants.

Dans le premier exemple on constate une différence d'environ 4 % d' Al_2O_3 entre deux segments à une extrêmement faible distance (10 cm). Dans le deuxième exemple, la différence de la teneur pour le premier segment est acceptable, tandis que pour le deuxième segment la différence de la teneur s'élève à environ 2.5% pour Al_2O_3 et ~1.7% pour Fe_2O_3 , pour une distance latérale de 2.29 m.

Suite à ces observations, on a analysé les données d'un nouveau sondage dans ce gisement chaque demi-mètre. Les rectangles rouges montrent la taille des échantillons qui pourraient être pris par la

méthode pratiquée chez AGS, le premier échantillon aurait une longueur d'un mètre et le deuxième 2m et le troisième 1m. Compte tenu du changement de lithologie chaque demi-mètre, les autres échantillons auront par conséquent une longueur de 50cm (figure IV.10).

Tableau IV.4 Comparaison des moyennes de la teneur des quelques composites sur les sondages à une faible distance

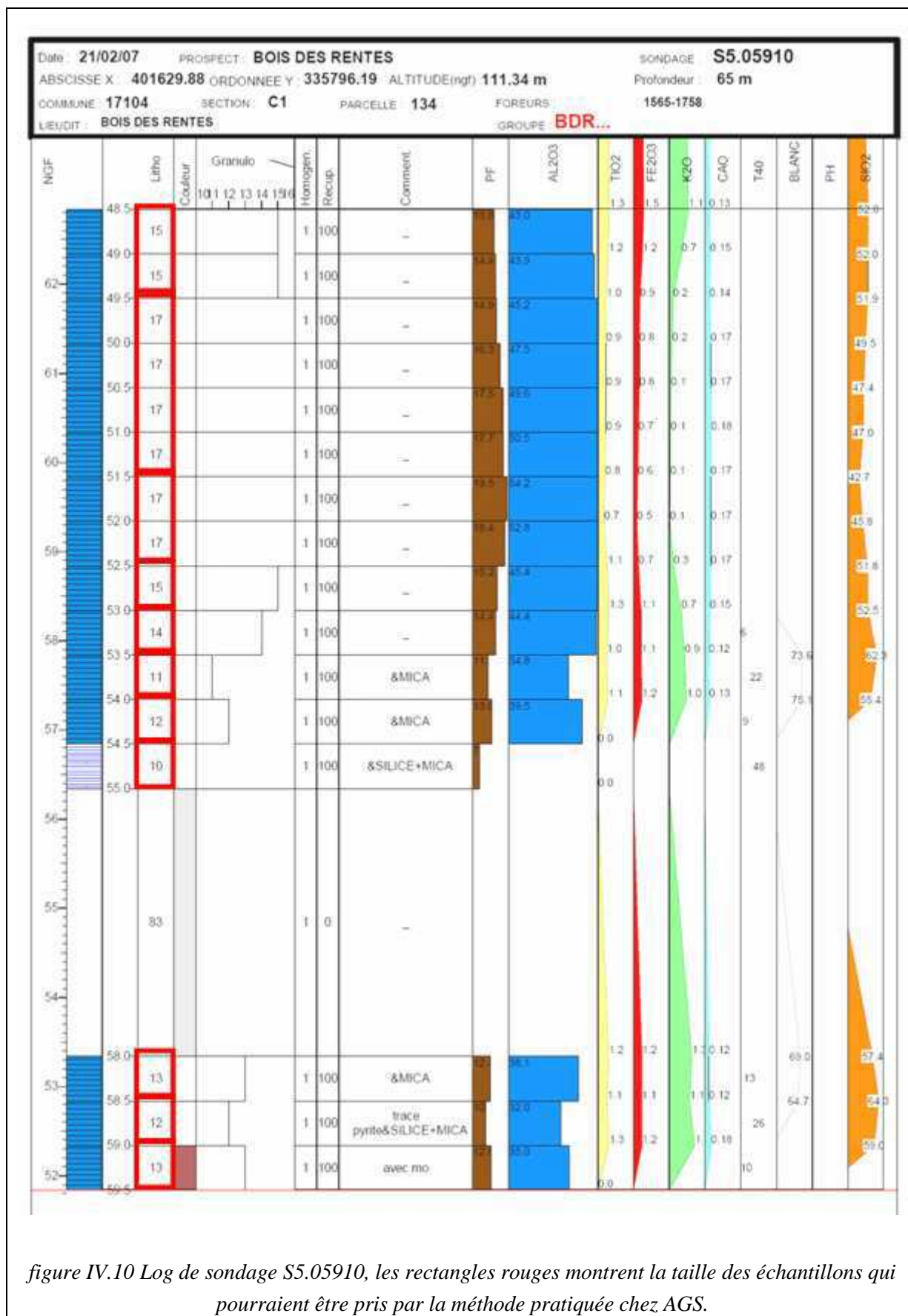
Nom SND	XSND	YSND	Z toit	Z Mur	Litho	PF	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
S5.05666	401535.41	335643.23	62.24	61.74	12	13.8	42.4	1.35	4.01
	401535.41	335643.23	61.74	60.24	14	14	42.65	1.51	3.84
	401535.41	335643.23	60.24	59.24	17	14.8	44.82	1.54	0.99
S5.05692	401535.41	335643.33	60.15	58.65	17	16.1	48.86	1.65	1.66
	401535.41	335643.33	58.65	57.15	17	14	45.74	1.29	1.01
Chevauchement	60.15-59.24				17	14.8	44.82	1.54	0.99
	Distance= 0.10m				17	16.1	48.86	1.65	1.66
S2.11693	401594.25	335667.09	65.1	64.6	15	14.1	41.59	1.42	2.67
	401594.25	335667.09	64.6	63.6	17	15.1	44.82	1.45	1.06
	401594.25	335667.09	63.6	62.1	17	15.4	45.59	1.9	0.95
S5.05743	401594.72	335669.33	64.9	63.4	17	15	45.86	1.45	0.86
	401594.72	335669.33	63.4	61.9	17	16.1	46.54	1.77	0.88
	401594.72	335669.33	61.9	60.4	17	18.9	52.36	1.63	1.22
Chevauchement	64.90-63.40				17	14.81	45.54	1.50	1.08
	Distance= 2.29m				17	15.00	45.86	1.45	0.86
	63.40-62.10				17	15.40	45.59	1.90	0.95
	Distance= 2.29m				17	16.10	46.54	1.77	0.88

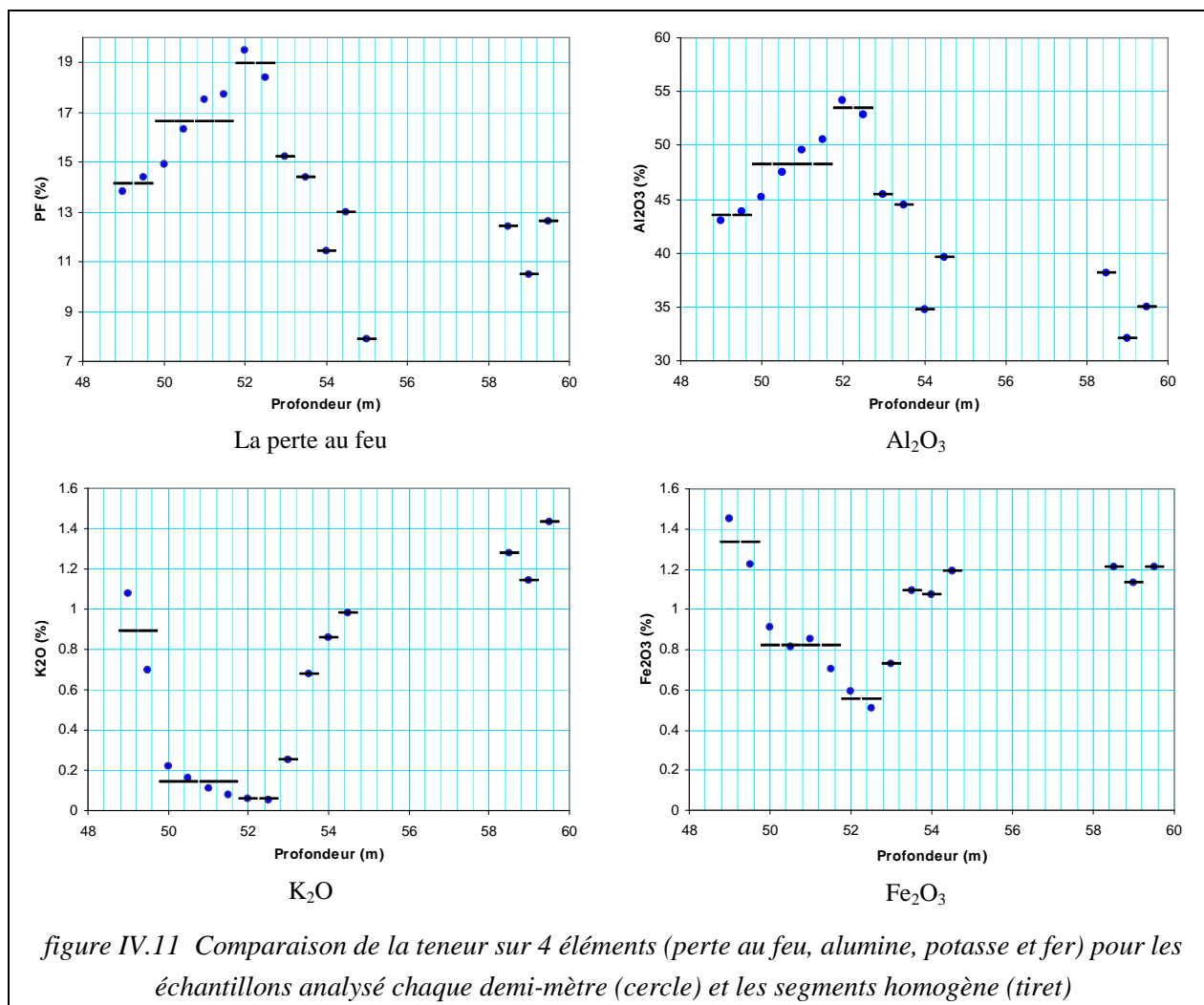
La figure IV.11 présente le résultat d'analyses chimiques des échantillons le long du sondage, On constate une ressemblance très marquée entre la variation d'Al₂O₃ et la perte au feu (PF). La corrélation entre le fer et la potasse est très bien présentée sur cette figure. La corrélation entre les variables est abordée au paragraphe IV.7.4, à l'échelle du bassin et dans certains gisements. Cette figure confirme la corrélation PF-Al₂O₃ et Fe₂O₃-K₂O à l'échelle très locale.

Dans le segment le plus long, la teneur en Al₂O₃ démarre à 45.2 % pour aboutir à 50.5 % soit un écart de ~5.3 % d'Al₂O₃ (voir figure IV.11) La moyenne de la teneur pour ce segment est égale à 48.2 %. Cette moyenne calculée est équivalente de la teneur mesurée pour l'échantillon de 2 m de long broyé et bien homogénéisé.

Une chute considérable de la teneur en Al₂O₃ peut être observée entre le segment 52.0-52.5 m et le segment 52.5-53.0 m, l'observation visuelle montre un changement graduel de la qualité d'argile sur une petite distance de 40 cm.

Une autre chute de teneur en Al₂O₃ est visible à la profondeur de 54 m. Ce genre de variation est facile à voir sur le terrain, par un changement brusque de la lithologie. Ce qui ne peut pas être distingué par les exploitants est les changements de premier genre. Surtout quand une unité présentée par un segment long est exploitée en différentes étapes en supposant la même valeur pour chaque partie exploitée.





L'extension d'une valeur mesurée ponctuelle ou d'un faible volume (ce qui est le cas d'échantillons carottés) à une masse ou un volume plus grand est toujours accompagné par une erreur, qu'on l'appelle l'erreur d'extension.

L'utilisation des valeurs par défaut pour combler les lacunes d'analyse, pose certains problèmes, comme un lissage de la variance. En plus dès que ces points participent à l'estimation d'un bloc, ils introduisent un écart entre valeur vraie et valeur par défaut. Cela peut être une source supplémentaire pour le biais conditionnel d'estimation. C'est à dire qu'on sous estime la partie riche du gisement et par contre on surestime la partie pauvre, parce que en général on attend un stérile plus riche au voisinage d'une couche riche mais la valeur par défaut sera inférieure à cette valeur, et inversement pour les couches moins riches. Au cas où on n'a pas d'échange entre les couches sédimentées cela ne peut pas être perturbant, mais l'existence des phénomènes de post-sédimentation met en évidence la circulation des fluides et donc des éléments chimiques.

Il faut savoir que cela est une sorte de conditionnement de limite du gisement.

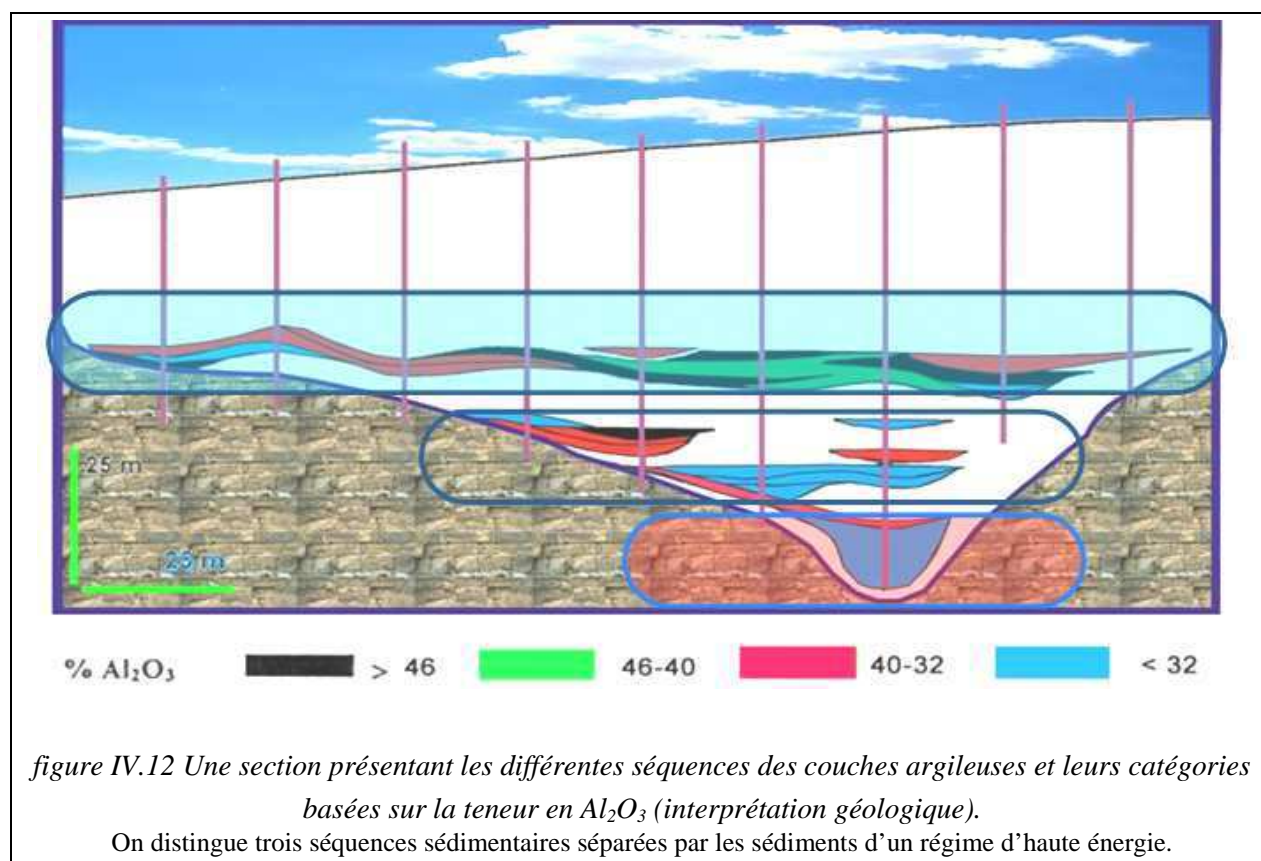
IV.2. Variabilité à l'échelle du gisement et du bassin sédimentaire

IV.2.1. Variation de la qualité ; observations sur le terrain

Comprendre la variation est indispensable pour gérer les réserves naturelles et surtout les ressources minérales. On profitera de l'outil géostatistique pour maîtriser la variation spatiale, mais avant d'exprimer ces variations en termes de modèle mathématique on a besoin de demi mètre les phénomènes physiquement responsables de ces variations.

Le phénomène de la sédimentation des dépôts d'argile paraît très simple, dans certains gisements de kaolin où l'on peut constater des couches de kaolin hectométriques à kilométriques continues et relativement homogènes. La genèse des gisements de kaolin du Bassin des Charentes obéit à des règles géologiques simples mais leur géométrie détaillée présente une grande complexité, renforcée par le fait que l'exploitant doit distinguer des argiles de qualités très différentes. Le terme qualité est entendu comme teneur en alumine (sur cuit).

La classification des réserves de kaolin charentais est faite par des fourchettes de teneur en Al_2O_3 (Tableau II.10; 46-50 ; 44-46 ; 42-44 ; 40-42 ; 37-40 ; 34-37 ; 30-34 et moins 30%). La figure IV.12 montre une section du gisement planton, pour simplifier la variation on a utilisé des fourchettes plus larges.



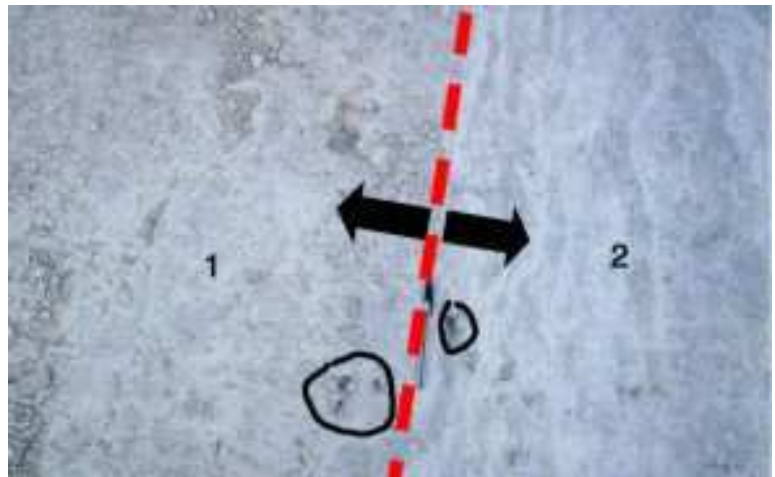
Pour une classification plus précise des séquences sédimentaires argileuses, on a besoin d'ajouter d'autres critères comme : l'existence des matières organiques, des micas, de la pyrite ou des smectites, et la teneur en oxyde de fer. La séparation des séquences ne sera possible que grâce à un modèle typologique.

Les phénomènes géologiques sont responsables de la variation des teneurs dans le gisement, ils ordonnent la corrélation et la covariance entre les variables mesurées sur les échantillons. Nous allons présenter cette relation à l'aide de quelques observations géologiques.

Dans la figure suivante (figure IV.13) on observe le changement de texture de l'argile avec une frontière quasiment nette. Les points noirs entre deux textures différentes d'argile, sont en fait de la pyrite écrasée par le godet de la pelle mécanique. L'existence de pyrite est le résultat d'activités post sédimentation. Dans cette figure on constate le changement important de la texture d'argile. On note dans la zone 2, des petites structures en forme des lentilles irrégulières et allongées (gisement Chez Maudet).

figure IV.13 Les points noirs entre les deux textures différentes d'argile sont en fait de la pyrite écrasée par le godet de la pelle mécanique.

Dans cette photo on constate le changement important de la texture d'argile entre les zones 1 et 2. Dans la zone 2, remarquez les petites structures en forme des lentilles irrégulières et allongées (gisement Chez Maudet).



La variance des variables peut évoluer d'un endroit à l'autre, cela veut dire qu'il est possible d'avoir une variance faible dans certains polygones et une variance plus importante entre les polygones. Afin d'assurer l'homogénéité de l'argile exploitée et expédiée à l'usine, le chef de carrière définit cette limite pour l'opérateur de la pelle mécanique, et supervise l'extraction de l'argile. Dans la figure IV.13, la différence de la texture d'argile liée à un changement de teneur en alumine, est bien visible entre la partie droite (2) et gauche (1). On peut voir que la trace laissée par la pelle est différente et peut être comparée au test traditionnel de « gratter au couteau », qui permet au chef de carrière de comparer et évaluer la qualité de l'argile (gisement Chez Maudet).

Certains changements peuvent être observés à une petite échelle. Imaginons un bassin de sédimentation avec une couche argileuse à la surface. Si l'humidité du système baisse, la surface de la couche se fendra (fentes de dessiccation). Ces fentes peuvent être remplies par des sables argileux. Il est possible que le sondage passe dans cette partie du terrain alors que dans un sondage très proche de celui-ci, l'échantillon peut être exempt de sable (figure IV.14)

Si on compare le volume des fentes au volume des parties complètement argileuses, on trouvera que la dilution de la teneur en argile dans la carotte n'est pas extrapolable à toute la surface autour du sondage (effet d'information).

On corrèle traditionnellement les sous parties des carottes rencontrées dans les sondages voisins, qui sont de la même matière. Mais, avoir des matériaux différents n'implique pas nécessairement que les situations soient complètement différentes. C'est pour cela qu'il est possible d'avoir différents types de corrélation.



Pour trouver une bonne corrélation entre sondages, on peut penser qu'il sera nécessaire de trouver une corrélation phénoménologique dans le bassin de sédimentation ou dans les séquences de dépôts. Autrement dit, il est nécessaire de trouver les règles expliquant une co-sédimentation (sédimentation en même temps dans un bassin). Comme cela on pourra discriminer les changements qui normalement existent dans un bassin et les changements de situation de sédimentation.

Par ailleurs, il sera intéressant de trouver des règles qui permettent d'avoir des modèles de sédimentation. Ces règles pourraient permettre de trouver des modèles géométriques qui encadrent les zones minéralisées. Sachant que le processus de sédimentation pour les trois séquences (cf. figure IV.12) n'était pas le même, on n'aura pas d'autre choix que de se contenter des signes d'une corrélation plus locale.

Normalement la fin des séquences est marquée par un changement violent de régime de sédimentation, représenté par la sédimentation de sables grossiers (code 82), l'effet d'érosion de ce régime sur la couche d'argile est visible comme les chenaux de sable sur le toit de l'argile. Cela peut être utilisé comme une clé pour tracer le toit de la deuxième séquence, mais pour l'automatisation de la reconnaissance des séquences sédimentées on a rencontré le problème de généralisation de ce critère sur l'ensemble du gisement.

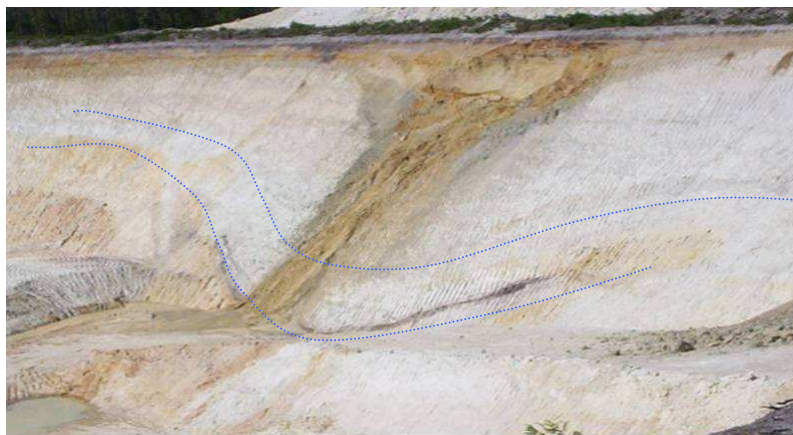
La figure IV.15 présente les différents faciès dans la carrière de Planton. On note l'effet de la paléo-topographie sur la forme des couches plus récentes, du lessivage de l'oxyde de fer des sables et de la contamination des argiles

Si les matières brutes ne sont pas bien homogénéisées, il est évident qu'on sera face à une variation dans les qualités et parfois la quantité des produits finaux. Tous les contrôles dans l'industrie, visent à obtenir des produits ayant des propriétés définies au mieux, répondant à des spécifications prédéfinies. Cette remarque qui peut sembler triviale peut constituer la source principale des discussions entre les producteurs et les consommateurs des matières minérales.

La variation de qualité des matières mélangées est une fonction de la variation spatio-temporelle de la matière brute entrant dans le processus de production, de leurs propriétés physiques (et minéralogiques) et de la méthode de mélange et d'homogénéisation. C'est pour cela qu'on a intérêt à avoir une meilleure connaissance de la variabilité spatiale des variables dans le gisement.

figure IV.15 Différents faciès dans la carrière de Planton.

Note : La visualisation de l'effet de la paléo-topographie sur la forme des couches plus récentes, du lessivage de l'oxyde de fer des sables et de la contamination des argiles (Gisement Planton).



IV.3. Analyse critique des données

IV.3.1. Associations minérales

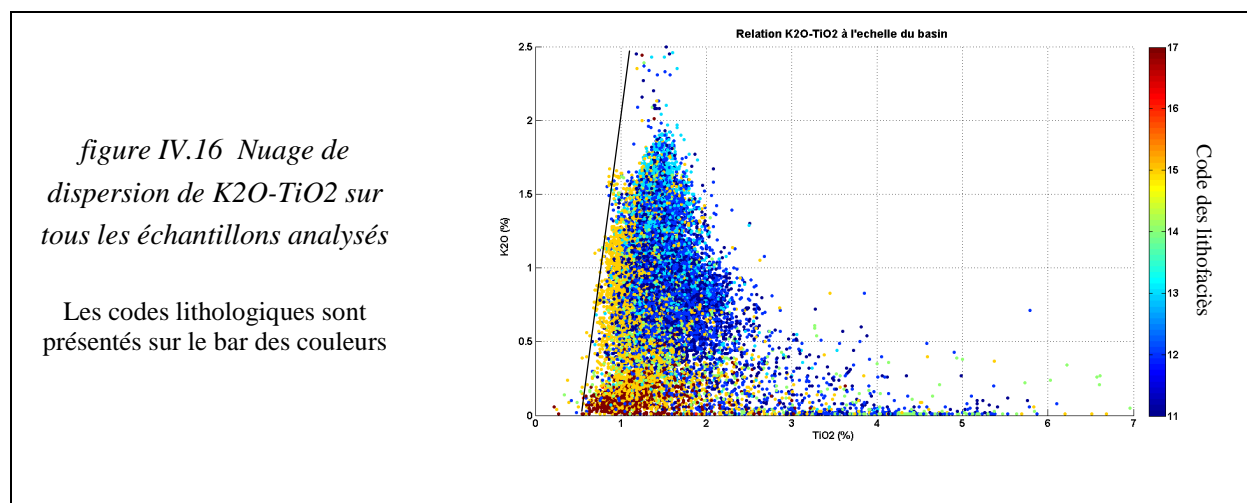
Marchadour (1980), Dubreuilh et al. (1984, 1987) ont étudié des associations minérales dans les carrières d'argiles du bassin des Charentes. L'exploitation du Bois de Bernet (5 km au Sud-Est de Montguyon) montre les associations et les successions typiques de ces formations. On y reconnaît 3 associations majeures de la base au sommet :

- (1) Kaolinites ordonnées typiques, accompagnées d'un peu de muscovite (2 ~ 5%).
- (2) Kaolinites désordonnées toujours accompagnées d'anatase (1 ~ 3%).
- (3) Kaolinites désordonnées accompagnées de smectites (jusqu'à 50%), de mica-illite et de feldspaths.

Selon ces auteurs, les trois associations minérales principales décrites ci-dessus se retrouvent sur l'ensemble du bassin. L'ordre de la succession de ces associations est toujours respecté : les niveaux à kaolinite désordonnée et anatase recouvrent toujours les niveaux à kaolinite ordonnée et mica, et les formations à kaolinite, smectite et feldspaths couronnent les coupes. Cependant les niveaux à kaolinite désordonnée et anatase viennent souvent à manquer et, dans ce cas, les formations à smectite et feldspaths recouvrent directement l'ensemble inférieur.

Sachant que K_2O est présent seulement dans les micas, et que l'anatase est un oxyde de titane, nous avons reporté dans la figure IV.16, les teneurs en K_2O en fonction des teneurs en TiO_2 pour présenter la relation entre la muscovite et l'anatase. Dans cette figure, on ne peut pas distinguer deux familles très distinctes. Pour les échantillons ayant une teneur en TiO_2 entre 1% et 2.5%, celle-ci paraît être indépendante de la teneur en potasse. Pour les échantillons riches en titane ($TiO_2 > 2.5$), la teneur en potasse reste inférieure à 1%.

En l'absence de mica, il existe au minimum 0.5 % de titane donc d'anatase. Lorsque la teneur en potasse augmente on constate une valeur minimale du titane (le tiret noir dans la figure IV.16) qui augmente également, ce qui peut correspondre à une substitution de l'alumine par le titane dans la couche octaédrique du mica. Les échantillons ayant une teneur élevée en TiO_2 (plus de 3 %) sont pauvres en K_2O (moins d'un pourcent de K_2O) et à l'inverse, dans les échantillons très riches en K_2O (plus de 1.5%) la teneur en TiO_2 ne dépasse pas 2 %.



On a donc bien un phénomène d'exclusion mica – anatase, mais il semble cependant difficile d'en tirer un critère de distinction.

IV.3.2. Répartition et succession des faciès

Nous avons vu dans le chapitre précédant que l'on distinguait divers codes lithologiques pour qualifier les argiles kaoliniques. La figure IV.17, présente la proportion des différents codes lithologiques par zone géographique (groupe de sondages). Cette proportion est calculée comme la somme des épaisseurs des échantillons d'un code donné rapportée à la somme totale des épaisseurs des échantillons analysés (on exclut tous les stériles) et exprimée en pourcentage. Il s'agit donc d'une approximation de leur portion volumique réelle ce qui est suffisant pour faire une comparaison très générale des variations lithologiques.

Toutes les lithologies kaoliniques ne sont pas toujours présentes. L'argile pierreuse (code 17), est absente dans les gisements du sud du bassin, mais fréquente au centre du bassin dans les gisements plus profonds qui sont plus proche de l'axe du synclinal (figure IV.19). Les gisements situés au bord du bassin sont pauvres en argile pierreuse : on constate par exemple que la fréquence des argiles pierreuses rencontrées dans les groupes d'ARLOT et de LAMAIN atteint 1 % seulement. L'argile pierreuse est probablement réduite ou absente sur les bords du bassin et plus présente au centre. En général, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la bordure du bassin l'épaisseur de la couverture mollassique augmente et masque l'argile. La localisation des gisements d'argile pierreuse demande donc une bonne connaissance des séquences lithologiques.

La variation des autres lithologies ne montre pas de structurations particulières. Le pourcentage des lithologies et leurs présences varient d'un gisement à l'autre. Certains gisements comme St Georges sont composés essentiellement d'argile maigre, d'argile demi-grasse à grain et d'argile demi-grasse tandis que dans un gisement tel que Bois des Rentes (BRENTES2), on rencontre tous les faciès de kaolin. Les gisements ayant des argiles pierreuses (la fréquence supérieure à 5%) sont présentés dans la dernière colonne. Comme on verra plus tard, dans ces gisements, la moyenne de la teneur en alumine des argiles pierreuses (et même certains échantillons d'argiles grasses) est supérieure à la teneur stœchiométrique du kaolin.

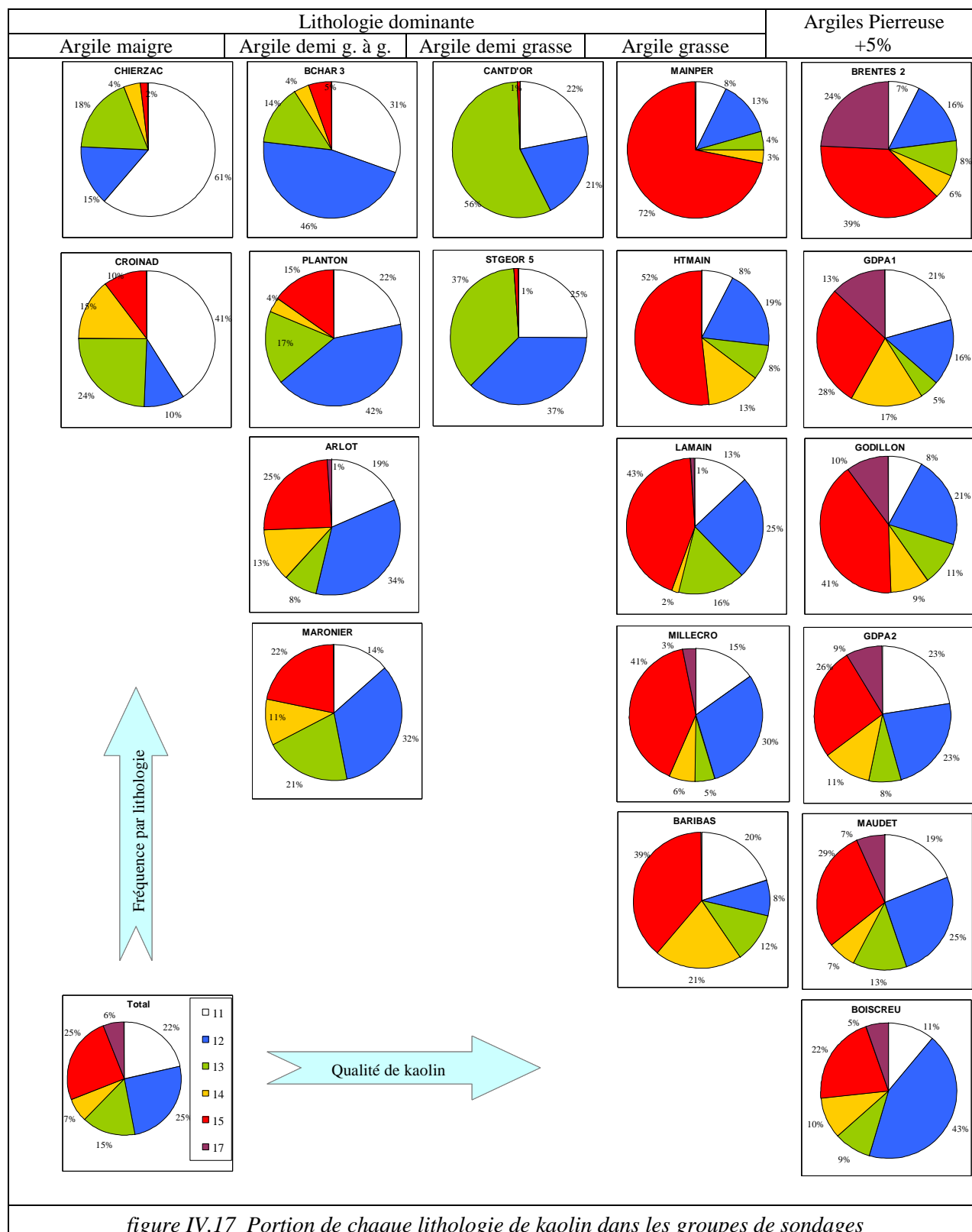


figure IV.17 Portion de chaque lithologie de kaolin dans les groupes de sondages

La lithologie argile grasse à grain (code 14) est la moins fréquente dans le bassin (seulement 11 % dans les groupes étudiés). L'argile demi-grasse à grain (code 12) et l'argile grasse (code 15) sont les lithologies plus fréquentes de kaolin.

Le Tableau IV.5 représente l'analyse statistique des successions des faciès entre une couche donnée (notée litho 1, en colonne) et la couche inférieure (notée litho 2, en lignes) dans le gisement Grand Pas. Il

s'agit de nombres de contact entre un faciès et le faciès inférieur. Le tableau se lit de la manière suivante : sur une ligne donnée, on peut lire le nombre de contacts vers le bas avec les différentes formations notées en colonne. Il y a contacts entre même faciès (par exemple l'argile grasse se superpose à elle-même dans 330 cas) du fait du découpage des carottes. Par exemple l'argile ligniteuse, ligne 16 recouvre 26 fois l'argile grasse (code 15 en colonne), et 14 fois le stérile (code 02 en colonne). Dans un autre gisement (Godillon) on trouve l'argile demi-grasse à grain sous les argiles ligniteuses plus fréquemment que l'argile grasse. Les argiles pierreuses (code 17) sont couvertes plus fréquemment par les argiles grasses ou directement par les stériles. Un échantillon classé comme l'argile très maigre peut être en contact direct même avec d'autre échantillon d'argile grasse ou plus rarement d'argile pierreuse. Le faciès grison qui est un conglomérat compacté, se trouve plus fréquemment au dessous des sables peu argileux (code 84), sable grossier (code 82) et sable argileux (code 85).

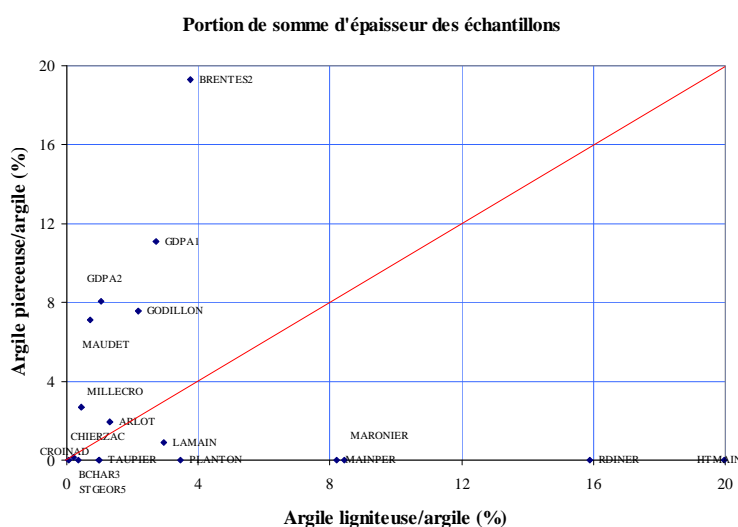
Les valeurs sur la diagonale montrent la fréquence des cas où l'on reste dans la même lithologie. Cela peut être utilisé comme un indice de l'épaisseur de chaque lithologie. Cette interprétation doit être faite avec beaucoup de précaution, car la fréquence de la succession dépend de facteurs divers, comme la longueur des échantillons, l'extension latérale, et la proportion de la lithologie dans le gisement.

Les échantillons d'argile grasse sont suivis 330 fois par les échantillons de même code, tandis que ce cas est très rare pour les échantillons d'argile demi-grasse (moins fréquente dans le gisement). L'observation du terrain confirme que les couches d'argile grasse sont plus épaisses que celles d'argile demi-grasse.

Un ordre parfait ne peut toujours être attendu compte tenu de la présence des phénomènes de l'érosion ou du remaniement du dépôt et les courants de turbidités. Mais il ne faut pas oublier que les variations lithologiques à très petite échelle ne sont pas enregistrées (la taille minimum des échantillons est un demi mètre).

La montre le pourcentage des argiles pierreuses (rapportées à l'ensemble des argiles) en fonction du pourcentage des argiles ligniteuses. On constate que le ratio de ces proportions est plus important dans les gisements dits hyperalumineux. La proportion d'argiles ligniteuses dans les gisements hyperalumineux reste très limitée. Inversement dans les gisements où les argiles ligniteuses sont relativement fréquentes, on ne trouve pas d'argiles pierreuses. Cela va dans le sens de l'hypothèse selon laquelle c'est la décomposition des argiles ligniteuses qui aboutirait à la formation d'argiles hyperalumineuses.

figure IV.18 Présence des argiles pierreuses sur les argiles ligniteuses



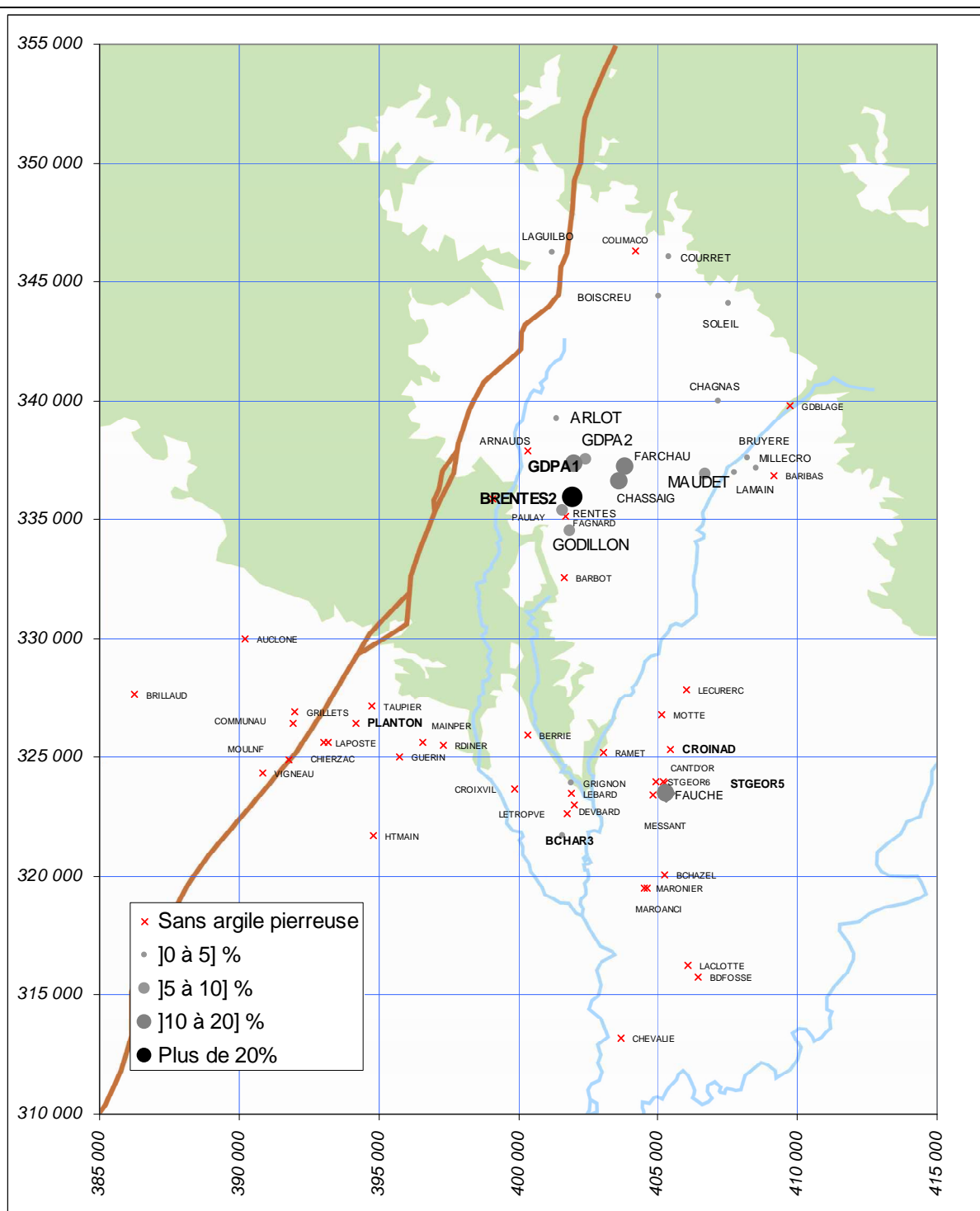


figure IV.19 Proportion d'argile pierreuse dans les groupes, et localisation des groupes étudiés

Tableau IV.5 Statistiques sur les contacts des faciès au long des sondages (GDPA1)

Contact (vers bas) Litho1 sur Litho2	Litho2	00 Hors litho	01 Stériles 1	02 Stériles 2	08 Argiles	10 Arg très maig	11 Arg maigre	12 Arg 1/2 G a G	13 Arg 1/2 G	14 Arg G a G	15 Arg grasse	16 Ar.ligniteuse	17 Arg.pierreuse	71 Indurations	72 Grisons	80 Galets	81 Gravier	82 Sab grossier	83 Sable fin	84 Sab peu arg.	85 Sab argileux	86 Arg sableuse	87 Arg déclassée	90 Calc massif	91 Calc tend/rem	92 Sab calcaire	93 Sab arg.calc.	94 Arg/elts calc	95 Arg versicol.	Somme d'épaisseur (m)
Litho1																														
00 Hors litho		0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0		7.7
01 Stériles 1		0	498	2	0	17	54	12	14	12	11	1	35	1	26	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0		5516.5
02 Stériles 2		2	0	440	0	18	86	39	24	67	39	1	11	1	7	0	0	0	0	0	0	0	0	79	0	0	0	0		2953.5
08 Argiles		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0		52.8
10 Arg très maig		0	0	93	0	21	52	24	18	11	5	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0		225.5
11 Arg maigre		0	0	184	0	104	85	76	34	52	18	2	1	0	0	0	0	10	6	23	25	0	0	2	0	0	0	0		606.7
12 Arg 1/2 G a G		0	0	42	0	21	107	90	17	54	23	3	1	0	0	0	0	3	5	12	17	0	0	3	0	0	0	0		468.5
13 Arg 1/2 G		1	1	26	0	14	40	21	19	24	44	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0		195.5
14 Arg G a G		2	0	79	1	21	97	52	15	115	71	11	8	1	0	0	0	0	3	7	11	0	0	0	0	0	0	0		532.0
15 Arg grasse		0	0	25	0	11	47	40	31	101	330	37	57	1	0	0	0	3	0	1	9	0	0	1	0	0	0	0		816.1
16 Ar.ligniteuse		0	0	14	0	1	3	2	1	5	26	13	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0		89.1
17 Arg.pierreuse		0	1	18	0	1	9	6	4	23	77	0	125	2	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0		365.6
71 Indurations		0	1	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		6.5
72 Grisons		0	23	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	21	2	0	0	3	0	0	0	0		188.5
80 Galets		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.0
81 Gravier		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.0
82 Sab grossier		0	0	0	3	0	10	13	5	8	10	0	3	1	5	0	0	2	0	33	18	0	0	1	0	0	0	0		996.5
83 Sable fin		0	0	0	0	1	6	9	2	8	10	0	5	0	0	0	0	1	2	5	12	0	0	0	0	0	0	0		575.5
84 Sab peu arg.		0	0	0	2	0	5	5	2	1	5	0	1	0	19	0	0	67	30	39	11	0	0	4	0	0	0	0		1010.3
85 Sab argileux		1	0	0	1	0	14	8	5	7	4	0	0	0	0	0	0	15	19	24	17	0	0	9	0	0	0	0		324.7
86 Arg sableuse		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.0
87 Arg déclassée		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.0
90 Calc massif		0	0	1	0	0	2	4	1	2	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		206.5
91 Calc tend/rem		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.0
92 Sab calcaire		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.0
93 Sab arg.calc.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.0
94 Arg/elts calc		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.0
95 Arg versicol.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.0

IV.3.3. Minéralogie et associations géochimiques

Nous avons vu que la teneur de l'argile en Al_2O_3 (mesuré sur l'échantillon cuit) est le premier paramètre de la grille de classification des réserves (Tableau II.10) avec les 9 classes de teneur en alumine de moins de 30 à plus de 50 % d'alumine. Cependant c'est une description lithologique basée sur les critères visuels (Tableau IV.3), qui est utilisée pendant la prospection et comme un outil de control en exploitation du gisement. Il est donc important de comprendre les relations qui peuvent exister entre ces deux classifications.

IV.3.3.1. Répartition de l'alumine

Le Tableau IV.6 et le Tableau IV.7 regroupent les moyennes et les écart-types des teneurs en alumine de chaque classe lithologique dans les groupes de sondage les plus importants. On constate que la présence d'argiles hyperalumineuses (code 17) décale vers le haut les teneurs moyennes de chaque classe lithologique et augmente les variances.

Tableau IV.6 Moyenne des teneurs en Al_2O_3 de chaque classe lithologique dans les groupes de sondages les plus importants

GROUPE	Code Lithologique						Moyenne par groupe
	11	12	13	14	15	17	
BARIBAS	32.33	35.81	35.23	37.84	41.40	*	37.62
BCHAR3	35.16	38.41	37.34	39.39	40.13	*	37.38
CHIERZAC	30.60	34.25	35.34	36.08	35.95	*	32.30
CROINAD	35.57	37.94	37.65	40.13	41.44	*	37.57
PLANTON	33.18	36.64	37.67	39.14	39.87	*	36.63
STGEOR5	33.08	36.14	37.91	39.90	39.92	*	35.94
ARLOT	32.59	36.78	38.50	42.09	42.63	44.23	38.32
GDPA1	34.57	36.13	37.74	39.26	44.04	46.38	40.01
GODILLON	33.63	37.39	38.99	42.24	43.94	46.92	41.31
MAUDET	33.47	36.73	38.43	40.10	42.78	46.25	38.91
BRENTES2	36.43	39.54	41.31	43.37	46.45	49.08	44.63
GDPA2	34.31	36.39	38.99	40.41	44.03	48.55	39.65
Moyenne par lithologie	33.01	36.67	37.69	40.36	43.01	48.12	38.28
Attendue	~30%	~34%	~37%	~40%	~42%	>44%	**

* l'argile pierreuse n'a pas été observée dans ce groupe

On constate que la valeur moyenne des argiles maigres (code 11) est en général supérieure à la teneur attendue. Cela est également juste pour l'argile demi-grasse à grain (code 12). En revanche dans les gisements sans argile pierreuse la moyenne de la teneur en Al_2O_3 est inférieure à la valeur attendue dans les argiles grasses (code 15). La moyenne et l'écart type sont calculés en utilisant la puissance des échantillons en tant que pondérateur.

Les gisements comportant de l'argile pierreuse ont un écart type total plus important (> 5) que les gisements sans argile pierreuse (3 à 4). La dispersion est plus forte dans les argiles grasses à grain (code 14), grasses (code 15) et pierreuses (code 17). La dispersion à l'intérieur de chaque classe lithologique est inférieure à la dispersion totale (sauf pour l'argile maigre de groupe BCHAR3). Cela montre que le regroupement des données n'est pas quelconque. En se basant sur l'écart type total (dans chaque groupe), trois séries de groupes sont reconnaissables :

- écart type de 3 à 4 (BARIBAS, BCHAR3, CHIERZAC, CROINAD, PLANTON, STGEOR5).
- écart-type à environ 5 (ARLOT, GDPA1, GODILLON, MAUDET)

- les groupes les plus variés comme GDPA2 et BRENTES2 (> 6).

Tableau IV.7 Ecart type des teneurs en Al_2O_3 de chaque classe lithologique dans les groupes de sondages les plus importants

GROUPE	Code Lithologique						Du groupe
	11	12	13	14	15	17	
BARIBAS	2.37	2.06	2.23	2.85	1.67	*	4.11
BCHAR3	3.21	2.20	2.08	1.92	1.64	*	2.96
CHIERZAC	3.23	2.45	2.31	2.06	3.07	*	3.66
CROINAD	3.39	2.05	2.58	2.63	3.01	*	3.57
PLANTON	2.79	2.14	2.01	1.70	1.73	*	3.10
STGEOR5	2.50	2.49	1.90	*	1.34	*	3.03
ARLOT	4.52	3.63	1.75	1.92	2.73	*	4.96
GDPA1	3.43	3.07	2.94	2.84	3.79	4.40	5.58
GODILLON	3.41	3.43	3.49	1.75	2.74	4.83	5.01
MAUDET	2.85	2.31	2.68	1.78	4.44	3.28	5.05
BRENTES2	3.61	2.66	2.17	4.82	5.31	6.07	6.33
GDPA2	3.49	2.99	5.65	2.57	4.84	5.01	6.10
Par code lithologique	3.66	3.07	3.05	3.19	4.24	5.58	5.58

* Absence ou nombre insuffisant d'échantillon pour calculer l'écart type pondéré

Les courbes figure IV.20 et figure IV.21, montrent l'épaisseur relative (fréquence) de chaque fourchette de teneur en Al_2O_3 pour chaque code lithologique. L'épaisseur relative est calculée en divisant la somme des épaisseurs (longueur de l'échantillon carotté) de chaque fourchette dans une lithologie donnée par la somme des épaisseurs de tous les échantillons appartenant à cette lithologie, et présenté en pourcentage. L'échelle des abscisses est la même pour toutes les figures, mais la limite sur l'axe vertical de chaque figure est choisie en tenant compte la fréquence relative pour une meilleure lisibilité des graphes. Les flèches verticales représentent la teneur attendue de chacun des codes lithologiques.

On constate que dans les gisements simples qui n'ont pas subi un lessivage très intense, la variation d' Al_2O_3 à l'intérieur de chaque classe lithologique est limitée, malgré de la présence de chevauchements entre les courbes de distribution de teneur en Al_2O_3 . Le pic de la distribution n'est pas très loin de la teneur classique attendue pour chaque classe et la variance de la teneur n'est pas très importante.

Dans les gisements riches, l'augmentation de la variance d'alumine à l'intérieur de chaque classe lithologique se manifeste par les courbes de distributions plus aplaties. Dans les gisements fortement touchés par les phénomènes post-sédimentation, on constate même des courbes bi ou polymodales.

Dans le cas du groupe BCHAR3, il y a peu d'échantillon d'argile grasse à grain (code 14) et pas d'argile code 14 dans STGEOR5, dans l'ARLOT peu d'argile pierreuse (code 17) ce qui se manifeste par un pic à 100 % dans ces deux figures.

Les courbes du groupe PLANTON, se présentent sous forme de courbes de distribution gaussienne, assez symétriques. Cela est valable aussi pour les argiles de code 13, 14 et 15 dans le groupe ARLOT.

Dans plupart des cas les courbes sont asymétriques, la forme de courbe change d'un groupe à l'autre. La bi ou polymodalité des courbes devient plus distincte dans les groupes les plus riches en Al_2O_3 . Les zones du chevauchement entre les courbes restent importantes, on regardera un peu plus loin la possibilité de distinguer les codes lithologiques en utilisant les méthodes multivariées.

La teneur de l'argile maigre dans le groupe BRENTES2 varie de moins 29 % à plus de 45 %. Une variation de même grandeur est observée pour GDPA2.

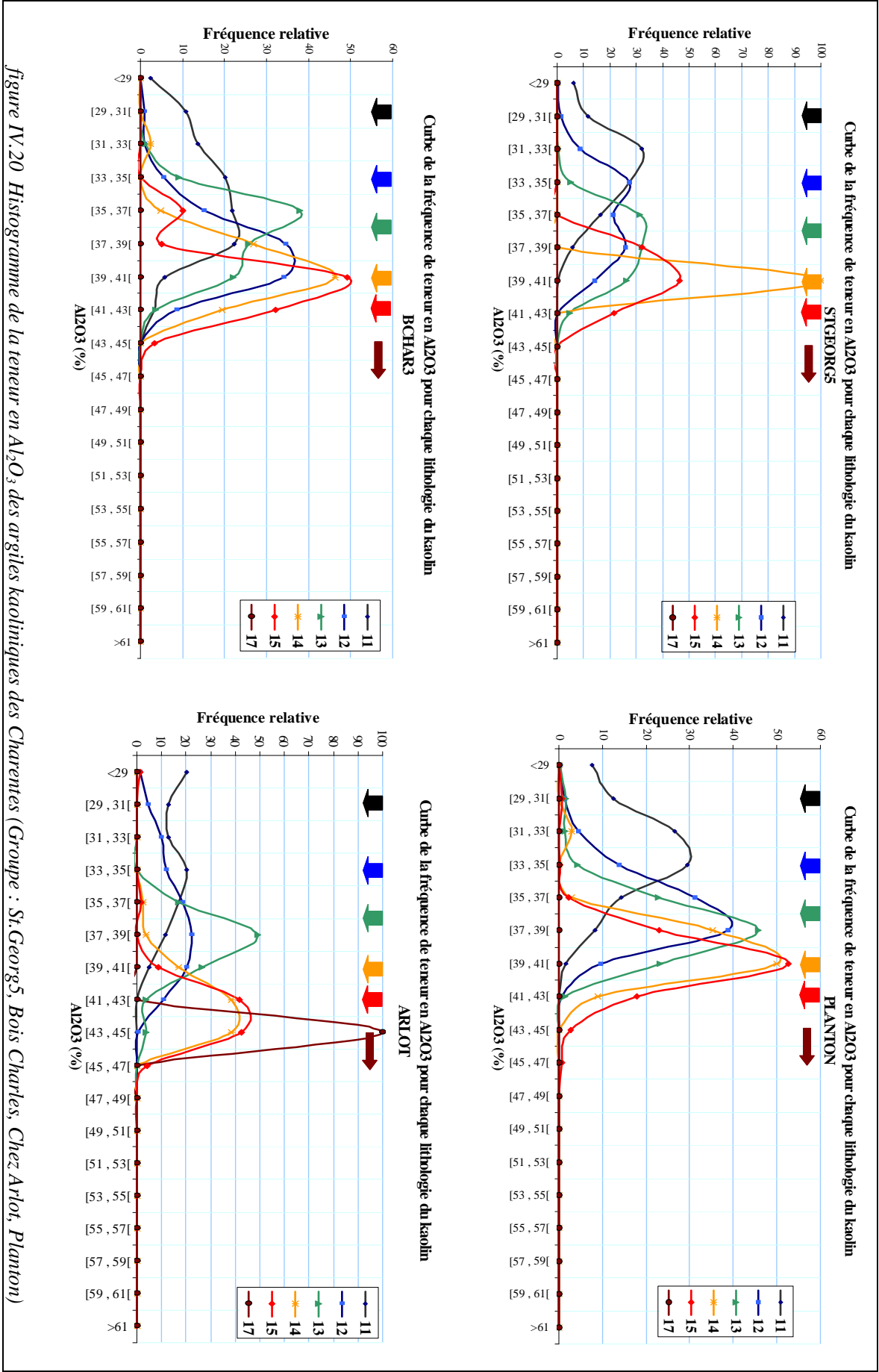


figure IV.20 Histoگرامme de la teneur en Al_2O_3 des argiles kaoliniques des Charentes (Groupe : St.Georg5, Bois Charles, Chez Arlot, Planton)

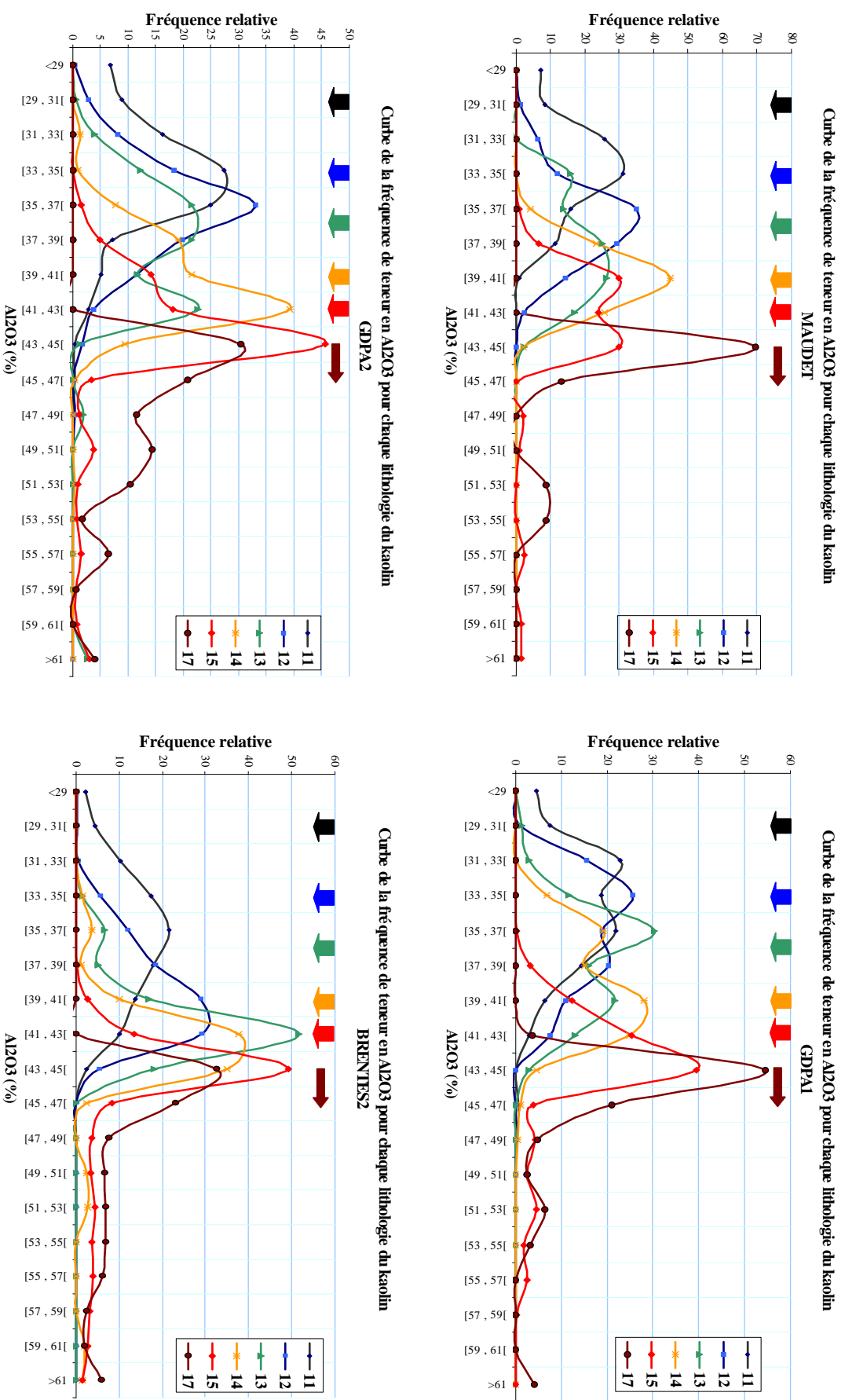


figure IV.21 Histogramme de la teneur en Al_2O_3 des argiles kaoliniques des Charentes (Groupe : Maudet, Grand Pas1, Grand Pas2, Bois des rentes)

Cette teneur élevée pour les argiles maigres pose la question de l'utilisation de critères visuels pour classer les échantillons. Ici la classe « argile maigre » (code 11) a été attribuée du fait de la présence de grains. Ces grains sont généralement interprétés comme étant du quartz ou plus rarement du feldspath. Or on ne peut expliquer la teneur élevée d' Al_2O_3 dans ces échantillons que par la présence de gibbsite (le kaolin pur constitué seulement de kaolinite contient 39.5% d' Al_2O_3 , ce qui atteint à 45.9% dans la kaolinite calcinée ou méta kaolinite. L'excès de la teneur en Al_2O_3 ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 46\%$) dans les argiles hyperalumineuses doit être expliqué par la présence d'un minéral plus riche en Al_2O_3 comme les hydroxydes d'Aluminium).

IV.3.3.2. Répartition des micas

La présence du mica n'est pas utilisée directement dans la définition des faciès lithologiques, (cf. Tableau IV.3). La méthode des "rognures" se base sur l'aspect de la surface (grattée) des échantillons, le taux de présence de grains et leurs traces sur la surface grattée. Pourtant, les petites plaques de mica très fréquentes dans les argiles grasses, sont très rares dans les argiles pierreuses.

Les graphes de la figure IV.22 montrent les courbes de distribution de la teneur en K_2O , pour 4 groupes des données. Il est acceptable de prendre la teneur en K_2O comme indice du taux de mica dans l'échantillon. La conclusion très générale qui peut être retirée de ces graphes, témoigne de la sensibilité très faible de la classification lithologique à la teneur en mica. Le groupe PLANTON montre des dispersions très ressemblantes pour différentes lithologies de kaolin. Pour les données de CHIERZAC, l'argile grasse est la plus riche en K_2O , tandis qu'à ARLOT, c'est l'argile demie grasse (code 13). Dans les gisements subissant un lessivage intense, on constate une teneur très faible en K_2O pour les argiles hyperalumineuses. Les argiles grasses très riches en Al_2O_3 montrent une faible teneur en K_2O , mais la teneur en K_2O de certains échantillons d'argile grasse peut atteindre plus de 1.5 % en K_2O (plus de 10 % de mica).

IV.3.3.3. Répartition du fer

Un rapport moyen $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ de 0.81 est observé à l'échelle du bassin des Charentes. Liétard (1977), Cases et al. (1982) en déduisent une teneur moyenne du fer en substitution dans le mica, et l'utilisent pour définir une méthode de calcul de la composition minérale majeure à partir des teneurs en Al, Si, Fe, K, Ti (dosés sous forme d'oxyde), H_2O^+ (Delineau 1994).

Cette corrélation $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ est envisageable à l'échelle du gisement mais aussi à plus petite échelle, les valeurs mesurées par microsonde, montrent bien une corrélation statistique entre les teneurs en Fe_2O_3 et de K_2O sur les particules de mica.

Le nuage de dispersion de K_2O et Fe_2O_3 est analysé pour 18 groupes de sondages ayant un nombre important d'échantillons. Le nuage est limité par une ligne ayant une pente voisine du rapport $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ observé par les études à la microsonde. On constate aussi une grande dispersion au-delà de cette ligne. Cette dispersion peut être expliquée par l'existence d'autres minéraux porteurs de Fer, comme les oxydes et les hydroxydes de fer ou les minéraux sulfurés. Dans tous les graphes, les valeurs faibles de Fe_2O_3 sont bornées par une limite linéaire. Cela montre une relation minéralogique entre Fe_2O_3 et K_2O , que l'on l'interprète par la présence d'un mica de la famille d'illite.

La ligne de corrélation entre K_2O et Fe_2O_3 ne passe pas par l'origine autrement dit même en absence du mica il existe une faible teneur de Fe_2O_3 , autour de 0.5 % à 0.7 % de Fe_2O_3 lorsque $\text{K}_2\text{O} = 0$. Ce fer est porté par la kaolinite comme l'a montré Delineau (1994) et les études de microanalyses (Liétard 1977 et Yvon et al. 1982). La formule générale de cette kaolinite ferrique est la suivante :

$\text{Si}_4(\text{Al}_{4-a}\text{Fe}_a)\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ avec $a=0.05$ ce qui donne une teneur de 7.8 % de fer pour cette kaolinite.

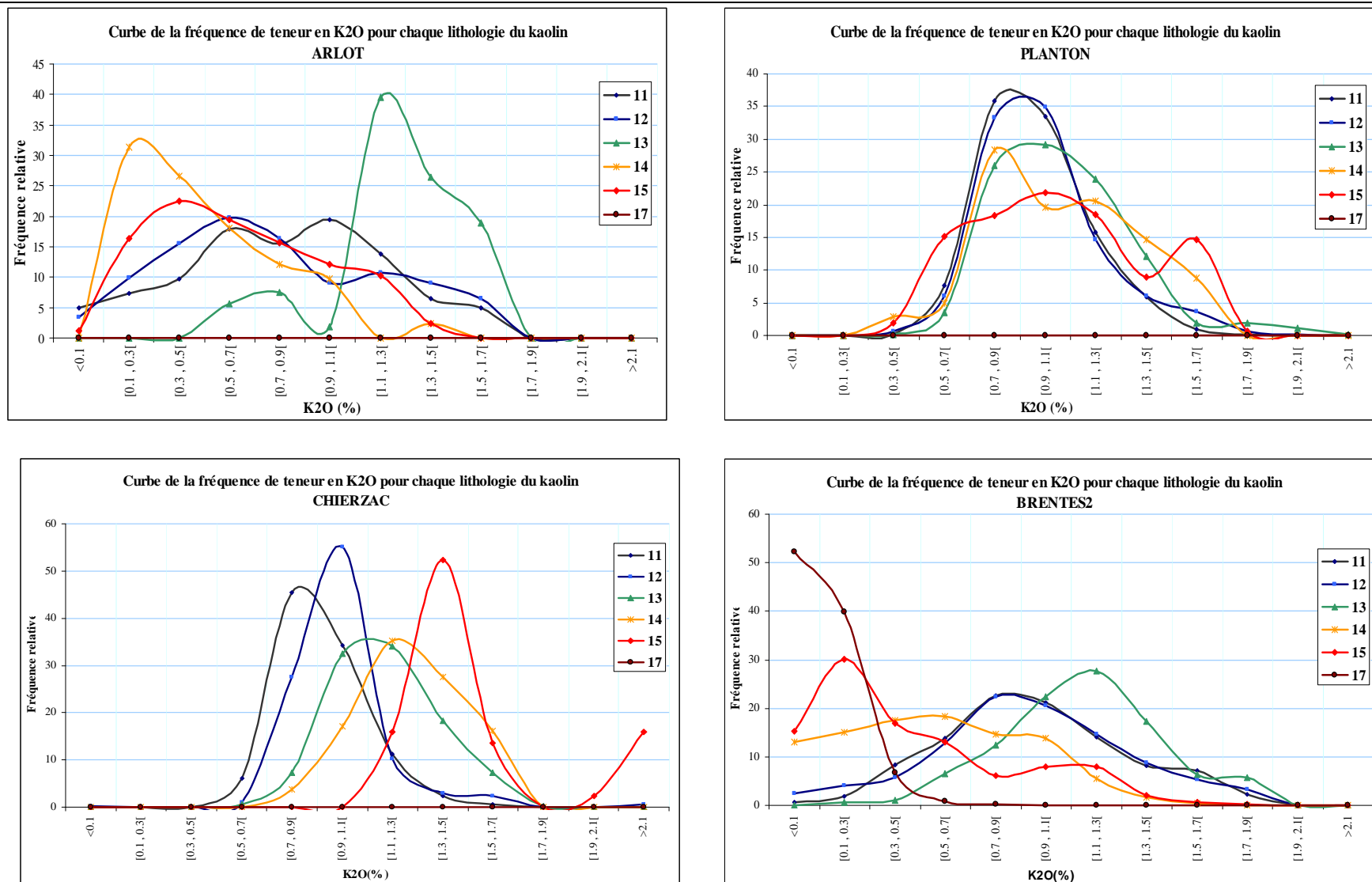


figure IV.22 Histogramme de la teneur en K₂O des argiles kaoliniques des Charentes (Groupe : Maudet, Grand Pas1, Grand Pas2, Bois des rentes)

En mesurant le soufre des échantillons, Delineau a pu calculer un autre paramètre qu'il appelle le fer total lié et a essayé de trouver une approximation du fer lié à la phase argileuse, il est définie de la façon suivante :

$$\text{Fe total lié} = \text{Fe}_{\text{total}} * (100 / (100 - \text{refus } 38\mu\text{m})) - \text{Fe}_{\text{pyrite}}$$

Dans la quelle le refus 38 μm est le pourcentage de refus sur le tamis de 38 μm , et le $\text{Fe}_{\text{pyrite}}$ est calculé par la valeur du soufre mesurée. Ce paramètre a été utilisé par Delineau, en tant qu'un des paramètres, pour définir la typologie du kaolin (voir typologie des kaolins dans le tableau II.4). Cet indice ne peut pas être utilisé pour définir la portion du fer remplacé dans la structure de la kaolinite. Car une partie très importante du fer sera apporté par les micas (ici illite) dans le système. Donc les valeurs plus élevées de fer total lié que la valeur du fer dans la formule de la kaolinite ferrique, témoignent d'une autre source de fer, essentiellement d'illite et dans certain cas les oxydes et hydroxydes très fins de fer.

Delineau propose une teneur entre 0.3% et 0.6% de Fe_2O_3 pour les argiles hyper alumineuses, témoignant du lessivage du fer et la destruction de réseau de la kaolinite, avec formation de la gibbsite, dans des échantillons exempts de mica.

La figure IV.23 et la figure IV.24, montrent les relations entre potasse et fer respectivement dans des gisements sans et avec argiles hyperalumineuses. La présence de fer diminue en général avec la diminution de la potasse. Le minimum du fer est plus faible dans les gisements riches en alumine, ce qui traduit simplement la pureté et la blancheur de ces produits (absence d'autres minéraux qu'alumineux). Cela est vrai, même pour un gisement comme Chez-Arlot qui est réputé pour sa teneur assez élevée en K_2O , et avec seulement quelques échantillons de code 17 (présentés par les points colorés en brun).

Dans le cas des argiles « normales » (figure IV.23) le nuage de points semble limité par la même droite traduisant le rapport fer/potasse dans les micas. Dans le cas des argiles hyperalumineuses (figure IV.24), on constate deux tendances distinctes. La première tendance qui est valable pour les échantillons riches en K_2O , est la même que précédemment. La deuxième tendance pour les faibles valeurs en potasse montre une pente plus faible.

Les échantillons pauvres en K_2O sont relativement moins riches en fer. Ceci peut être expliqué partiellement par le lessivage plus avancé du mica dans cette famille, à cause de la mobilité plus importante du potassium en comparaison avec celle du fer. Un autre facteur pourrait être le lessivage partiel du kaolin ferrique et l'altération du mica en kaolinite.

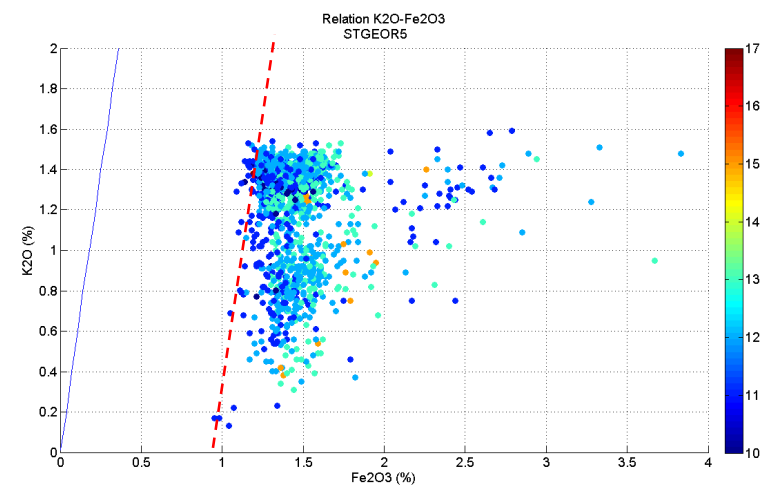
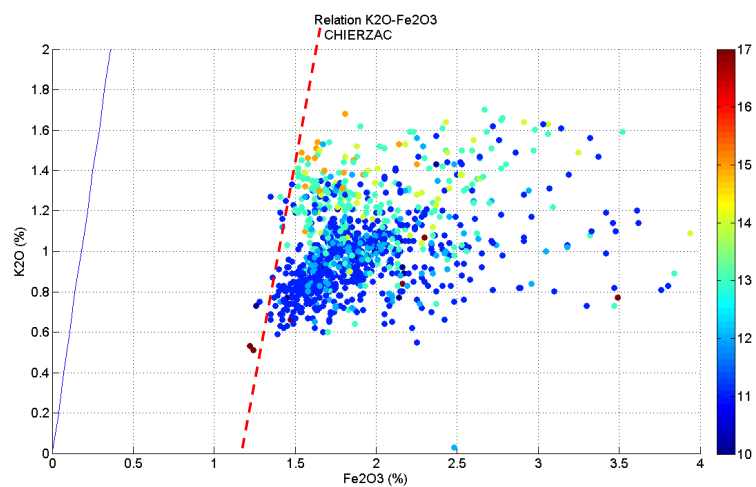
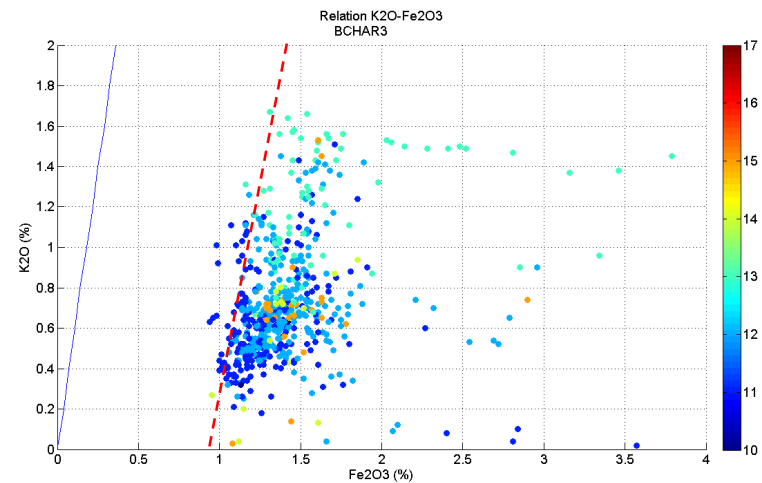
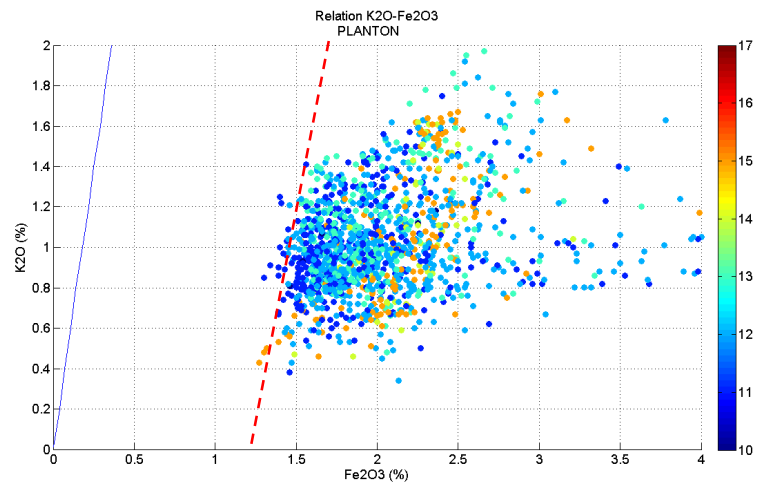


figure IV.23 Nuage de dispersion de K₂O-Fe₂O₃ (PLANTON, BCHAR3, CHIERZAC, STGEOR5)

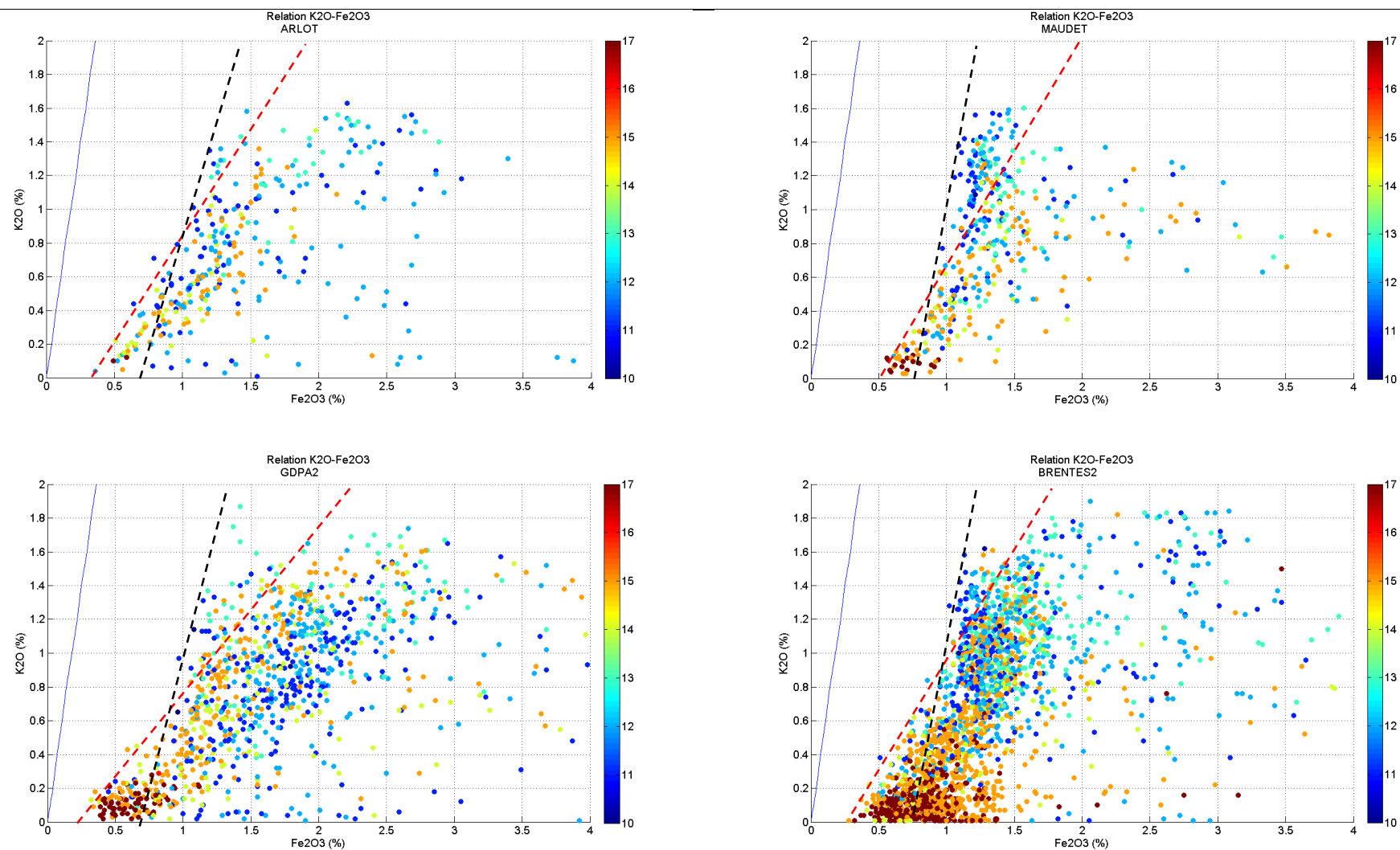
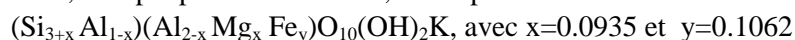


figure IV.24 Nuage de dispersion de $K_2O-Fe_2O_3$ (ARLOT, MAUDET, GDPA2, BRENTES2)
les droites en pointillé représentent les tendances de rapport K_2O/Fe_2O_3 dans les échantillons, la droite fine représente le rapport K_2O/Fe_2O_3 du mica

IV.3.3.4. Répartition de la magnésie

La figure IV.25 montre la relation entre la potasse et la magnésie. La limite du nuage dans la diagramme, excepté pour la BCHAR3, correspond bien à la formule du mica définie par la microsonde:



C'est-à-dire un rapport $\text{MgO}/\text{K}_2\text{O} = 0.08$

En l'absence de potasse donc de mica, il reste une quantité de l'ordre de 0.05 % de magnésie. Ce MgO pourrait être de la brucite. Banos et al. (1983) ont observé des couches intercalaires partielles de brucite, dans une étude de microscopie électronique en transmission à haute résolution de biotite tectoniquement déformée, accompagné par des couches de talc et de couches de chlorite, interstratifiées dans la structure du mica et parallèle à la surface de clivage. La présence de brucite est interprétée comme la brucitisation d'une couche intercalaire du mica. C'est un exemple d'un processus chimique à la échelle atomique favorisé par des microstructures de déformation.

Le groupe BCHAR3 qui correspond aux échantillons de l'ancienne carrière de Bois Charles, se comporte complètement différemment. Cela semble lié aux observations de Delineau qui a montré la présence d'argiles gonflantes et de Chlorites dans certains échantillons des carrières Bois Charles et Chez Arlot (BCH et CHA).

IV.3.3.5. Altération des micas

Les graphes de la figure IV.26 montrent les nuages de corrélation entre la teneur de K_2O des échantillons et leurs teneurs en Al_2O_3 pour quelques groupes de sondages. La ligne rouge sur les graphes présente la composition binaire kaolin-illite et la ligne noire représente la composition binaire kaolin-muscovite. La chute de K_2O vers les échantillons les plus riches en alumine, montre une tendance parallèle à la ligne de la composition kaolinite-illite. En approchant à la teneur stœchiométrique en alumine de la kaolinite, la teneur en potasse baisse significativement. Ce schéma témoigne du phénomène d'incompatibilité thermodynamique de la coprésence de mica et de gibbsite.

Nous avons vu dans le chapitre précédant, que la formation de la gibbsite peut être très locale, à l'échelle des microsystèmes. Mais à une échelle plus grande, les échantillons d'argiles hyperalumineuses sont décrits exempt de quartz et de mica.

La distance entre les points et la ligne de composition théorique de mélange kaolin - illite peut être expliquée par la présence d'un minéral (sans alumine ni potasse), très probablement le quartz.

Dans les groupes plus riches en alumine, les points dépassant la limite théorique de la composition de la kaolinite sont caractérisés par une teneur très faible du K_2O . Cette teneur très faible de K_2O peut provenir des restes des illites altérées. Dans tous les cas la forme de la chute de teneur en K_2O est une évidence de la dissolution de l'illite et la recristallisation de la kaolinite (ou la gibbsite, formée par les colloïdes libérés qui sont riche aluminium) dans les sols altérés ou dans les dépôts transportés.

Dans le cas des gisements BCAHR3 et STGEOR5 (Gisement sans argile hyperalumineuse), les points de graphe se situent loin de la ligne de la composition binaire de kaolinite-illite, donc dans ces échantillons, kaolinite et l'illite sont accompagné par des autres minéraux (quartz). Les argiles des codes différentes montrent une structuration dans le graphe du gisement STGEOR5, ce qui n'est pas le cas pour BCHAR3.

Les échantillons de groupe MAUDET, se rapprochent plus à la composition binaire, on constate la chute de la teneur en K_2O pour les échantillons riche en alumine, cette tendance est très bien représentée pour le cas du groupe BRENTES (gisement Bois Des Rentes (BDR)).

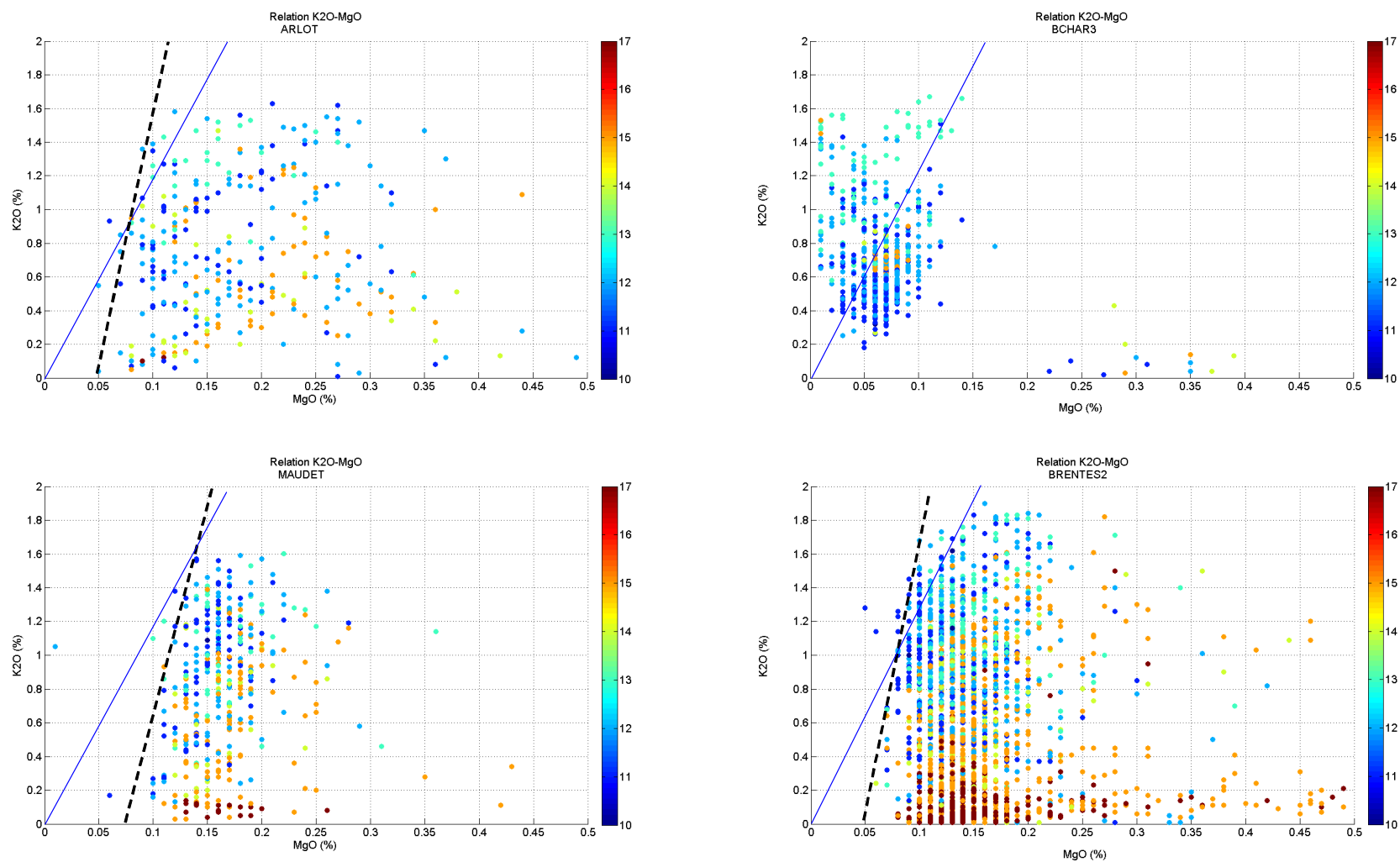


figure IV.25 Nuage de dispersion de K₂O-MgO (ARLOT, BCHAR3, MAUDET, BRENTES)
la droite fine représente le rapport K₂O/MgO du mica et la droites en pointillé représente la tendance de rapport K₂O :MgO dans les échantillons

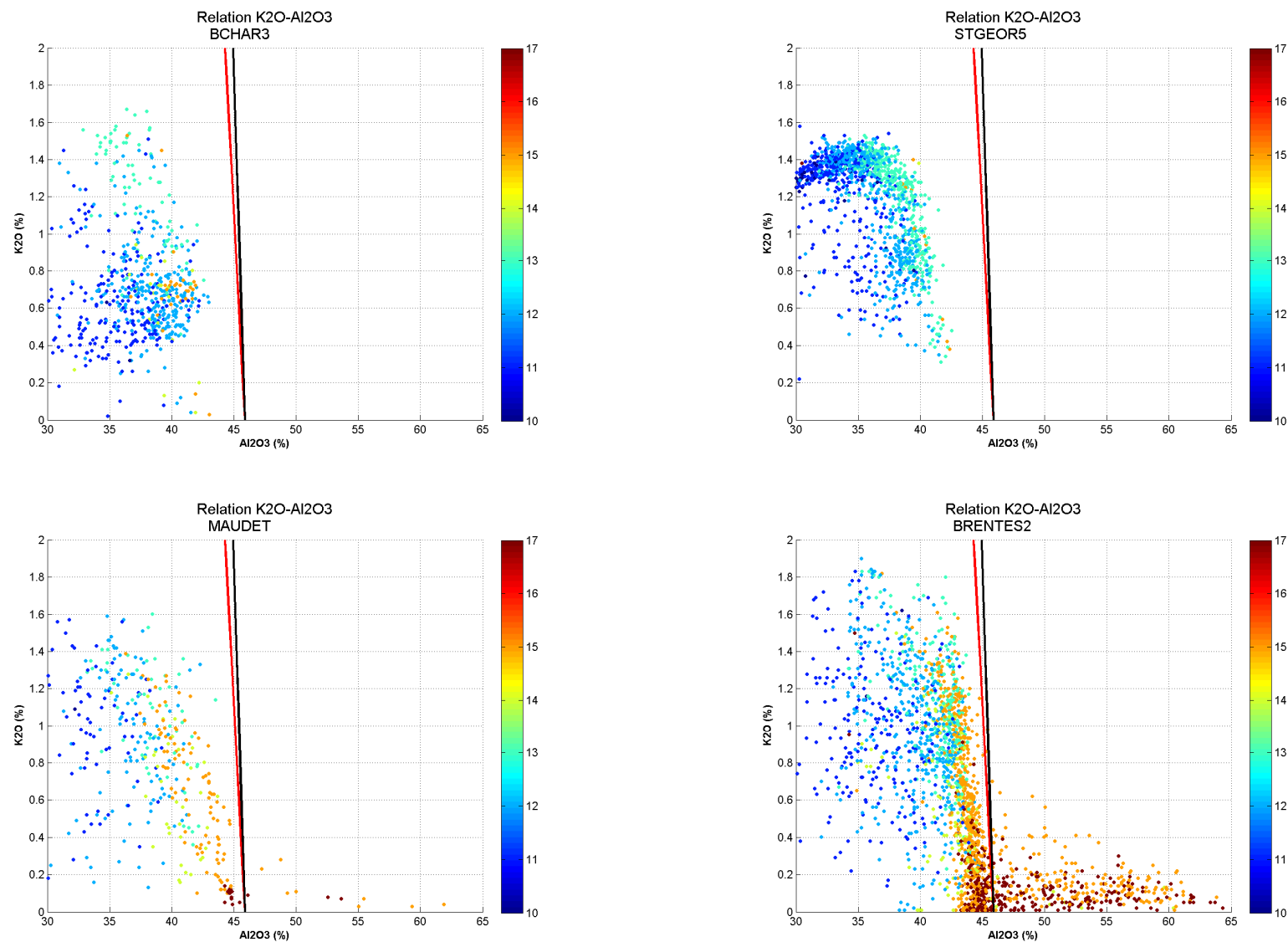


figure IV.26 Nuage de dispersion de $K_2O-Al_2O_3$ (BCHAR3, STGEORG5, MAUDET, BRENTES2)

En rouge la droite correspondant à la composition binaire kaolin-illite ; en noir la droite correspondant à la composition binaire kaolin-mica

IV.3.4. Analyse statistique à plusieurs variables

En première approximation, on peut considérer que l'analyse statistique à plusieurs variables est née aux environs de 1930. L'analyse en composantes principales (ACP) en tant que méthode de statistiques multivariées a été créée avant la deuxième guerre mondiale. Cependant, l'application plus large de cette méthode s'est seulement produite dans les années 60, pendant la « révolution quantitative » en sciences naturelles et en sciences sociales (Makiewicz et al. 1993). L'analyse en composante principale (ACP) détecte des dépendances linéaires entre les variables et remplace des groupes de variables corrélées par de nouvelles variables non-corrélées, qu'on appelle les composantes principales (Trauth 2006).

Techniquement parlant, l'ACP est une transformation linéaire orthogonale qui transforme les données dans un nouveau système du même rang tel que la plus grande variance par n'importe quelle projection des données se trouve sur la première coordonnée (appelée la première composante principale), la deuxième plus grande variance sur la deuxième coordonnée et ainsi de suite.

L'analyse des composantes et l'analyse factorielle peuvent être utilisées pour procéder à l'interprétation d'observations ne comportant, à priori, aucune distinction, ni entre variables ni entre individus (Dagnelie 1975). Certaines méthodes de calcul sont pratiquement identiques dans les deux cas. Ces deux groupes de méthodes sont souvent confondus. Dans l'ACP, toute la variance observée est analysée, alors que dans l'analyse factorielle, c'est seulement la variance commune (la variation partagée) qui est analysée. Dans la plupart des cas, ces deux méthodes donnent habituellement des résultats très semblables. Cependant, l'analyse en composantes principales est souvent préférée en tant que méthode permettant la réduction de l'espace des données, alors que l'analyse factorielle principale est souvent préférée quand le but de l'analyse est détecter la structure de ces données.

L'analyse factorielle a été utilisée par Galan et al. (1998) pour étudier la relation entre les propriétés industrielles du kaolin et sa composition chimique et minéralogique. Une autre étude par Aparicio et al. (2004) profite de cette méthode pour mettre en évidence la dimension fractale des grains de kaolin avec ses propriétés structurales.

Pour disposer de variables plus nombreuses, on utilise également des variables de composition minéralogique des échantillons. La composition minéralogique est calculée à partir des analyses chimiques en se basant sur les formules minéralogiques déjà évoquées, avec les hypothèses suivantes :

- Phengite (illite/mica) est la principale porteuse du potassium, donc sa teneur est calculée directement en utilisant la teneur en K_2O .
- Le reste de l'alumine provient de la kaolinite.
- Si la somme de la silice utilisée pour construire de la kaolinite et de l'illite est inférieure à la teneur en SiO_2 de l'échantillon, le reste de la silice est pris en compte en tant que quartz
- Si cette somme dépasse la teneur en SiO_2 , la teneur du quartz est présumée égale à zéro, le taux de présence de la kaolinite est calculé en utilisant le reste de la silice de l'illite, et le reste de l'alumine (d'illite et de la kaolinite) porte sur la teneur en gibbsite.
- H_2O montre la perte au feu attendue des minéraux principaux (gibbsite, kaolinite et illite), la différence de cette valeur avec la perte au feu peut donner une approximation des autres sources de perte au feu, comme les matières organiques, la pyrite, etc. Les matières organiques sont la composante essentielle du reste de la perte au feu.

Les données évidemment aberrantes (fautes de saisies présumées, ordres de grandeurs incohérents) sont écartées de ce calcul.

Avant d'entrer dans une analyse plus approfondie des données, il est conseillé d'étudier la matrice de corrélation entre les variables. Le Tableau IV.8 nous fournit le coefficient de corrélation calculé en utilisant les données des échantillons qui ont une analyse chimique complète.

Une corrélation très forte est constatée entre Al_2O_3 et les variables : SiO_2 , Kaolinite, Quartz et H_2O (perte au feu causée par la kaolinite, l'illite et la gibbsite). Une corrélation moins forte se manifeste entre MgO et K_2O ou MgO et illite. La corrélation entre K_2O et Illite est imposée par les hypothèses du calcul. La relation avec MgO tient également au calcul compte tenu de la formule attribuée au mica. La perte au feu (attribuée à H_2O) est liée à la perte au feu totale. Cette corrélation peut être interprétée comme une erreur systématique de sous-estimation de la gibbsite en terme de composition minéralogique. Cette hypothèse est en contradiction avec la corrélation faible (0.31) entre le reste de PF et l'alumine. Malgré cette faible corrélation entre le reste de PF et Al_2O_3 , les échantillons riches en matière organique, sont généralement assez riches en Al_2O_3 (cf. figure V.2 Relation entre la PF et la teneur en Al_2O_3 calcinée pour les données de la zone sondée 10*10m du gisement BDR). Ce qui entraîne que le faciès d'argile "grasse brune" peut probablement être attribué à la famille des argiles hyperalumineuses.

La corrélation entre la chaux avec le reste de PF, pourrait témoigner de la présence de gypse et/ou d'argiles calciques (smectites). On peut d'ailleurs signaler que les valeurs très élevées en CaO sont liées aux milieux très riches en matières organiques (PF très élevée).

A cause des effets réciproques et complexes entre variables, l'interprétation des coefficients de corrélation n'est pas toujours facile, par exemple on sait qu'une partie de H_2O est calculée en utilisant la teneur en illite, mais le coefficient de corrélation entre ces deux variables est négatif (-0.64). Cela provient du poids plus important de la kaolinite et de la gibbsite dans le calcul d' H_2O , ce qui implique forcément qu'il existe une corrélation négative (la somme des teneurs de ces minéraux est bornée à 100% donc l'augmentation d'un d'entre eux, entraîne la baisse de la teneur des autres).

L'oxyde de titane, de sodium et P_2O_5 ne montrent pas de corrélations significatives avec les autres variables.

Pour mieux comprendre la relation entre les variables, nous avons utilisé la méthode de la classification ascendante hiérarchique. La figure IV.27 montre les regroupements des variables de composition chimique pour 4 groupes de données. Dans la plus part des cas les deux familles de PF- Al_2O_3 - SiO_2 et K_2O - MgO - Fe_2O_3 sont distinctes.

Ces relations restent valables à l'échelle du gisement, le Tableau IV.9 montre la matrice de corrélation entre les éléments en oxyde dans une zone du gisement de BDR (densément échantillonnée). On perçoit une corrélation forte entre PF, Al_2O_3 et SiO_2 qui indique la présence du kaolin (et de la gibbsite) et une corrélation entre ces variables avec K_2O et MgO qui peut être interprétée par la présence de mica (illite ou phengite).

La présence d'une corrélation n'implique pas de causalité. Pire la corrélation entre deux variables peut n'indiquer aucune relation du tout. Il suffit qu'une tierce variable soit une cause commune. On parlera dans ce cas de confusion. On rappelle que l'interprétation de la statistique en termes de causes et d'effets est particulièrement délicate et ne peut pas se faire sans une bonne connaissance du système.

L'analyse factorielle des données de chaque groupe montre que les 5 premiers facteurs peuvent quasiment expliquer la totalité de la variance des données.

La figure IV.28 montre la portion de la variance totale expliquée par chaque facteur. Les deux premiers facteurs expriment 90 % de la variance. La ressemblance dans l'évolution du rôle des facteurs peut témoigner d'une minéralogie moyenne, très générale à l'échelle du bassin. Cette ressemblance est observée au niveau du regroupement des variables sur les graphes des composantes principales.

Tableau IV.8 Matrice de corrélation entre les variables de la composition chimique et minéralogique sur tous les échantillons ayant une analyse chimique complète.

	PF	Al2O3	TiO2	Fe2O3	Na2O	K2O	CaO	MgO	SiO2	P2O5	Gibbsite	Kaolinite	Illite	Quartz	H2O	PF - H2O
PF	1.00	0.70	-0.14	-0.15	0.01	-0.38	0.60	-0.09	-0.70	0.24	0.34	0.47	-0.42	-0.72	0.55	0.89
Al2O3	0.70	1.00	-0.17	-0.32	-0.01	-0.46	0.24	-0.30	-0.96	0.21	0.39	0.89	-0.48	-0.98	0.96	0.31
TiO2	-0.14	-0.17	1.00	0.02	0.15	-0.26	-0.03	-0.05	0.08	-0.17	-0.06	-0.05	-0.25	0.09	-0.07	-0.14
Fe2O3	-0.15	-0.32	0.02	1.00	0.02	0.36	0.08	0.40	0.14	-0.09	-0.09	-0.38	0.36	0.25	-0.38	0.03
Na2O	0.01	-0.01	0.15	0.02	1.00	0.01	0.04	0.08	-0.02	0.05	0.03	-0.03	0.01	0.00	-0.02	0.03
K2O	-0.38	-0.46	-0.26	0.36	0.01	1.00	-0.17	0.66	0.37	0.06	-0.16	-0.62	1.00	0.51	-0.63	-0.11
CaO	0.60	0.24	-0.03	0.08	0.04	-0.17	1.00	0.36	-0.30	0.16	0.09	0.11	-0.19	-0.30	0.13	0.64
MgO	-0.09	-0.30	-0.05	0.40	0.08	0.66	0.36	1.00	0.18	0.10	-0.12	-0.44	0.65	0.29	-0.45	0.15
SiO2	-0.70	-0.96	0.08	0.14	-0.02	0.37	-0.30	0.18	1.00	-0.22	-0.39	-0.82	0.40	0.97	-0.90	-0.34
P2O5	0.24	0.21	-0.17	-0.09	0.05	0.06	0.16	0.10	-0.22	1.00	0.20	0.08	0.06	-0.18	0.13	0.21
Gibbsite	0.34	0.39	-0.06	-0.09	0.03	-0.16	0.09	-0.12	-0.39	0.20	1.00	0.04	-0.16	-0.25	0.35	0.22
Kaolinite	0.47	0.89	-0.05	-0.38	-0.03	-0.62	0.11	-0.44	-0.82	0.08	0.04	1.00	-0.63	-0.92	0.95	0.04
Illite	-0.42	-0.48	-0.25	0.36	0.01	1.00	-0.19	0.65	0.40	0.06	-0.16	-0.63	1.00	0.53	-0.64	-0.15
Quartz	-0.72	-0.98	0.09	0.25	0.00	0.51	-0.30	0.29	0.97	-0.18	-0.25	-0.92	0.53	1.00	-0.94	-0.34
H2O	0.55	0.96	-0.07	-0.38	-0.02	-0.63	0.13	-0.45	-0.90	0.13	0.35	0.95	-0.64	-0.94	1.00	0.11
PF- H2O	0.89	0.31	-0.14	0.03	0.03	-0.11	0.64	0.15	-0.34	0.21	0.22	0.04	-0.15	-0.34	0.11	1.00
Remarque	R ²	Corrélation forte] 0.75 à 1] ou]-0.75 à -1]						R ²	Corrélation moins forte] 0.50 à 0.75] ou]-0.50 à -0.75]							

Tableau IV.9 Matrice de corrélation entre les éléments en oxyde pour le gisement Bois Des Rentes (BDR)

VARIABLE	Al2O3	Fe2O3	Na2O	MgO	K2O	P2O5	PF	SiO2	TiO2
Al2O3	1	-0.26	0.23	-0.5	-0.68	0.32	0.78	-0.98	-0.35
Fe2O3	-0.26	1	-0.01	0.32	0.33	0.03	-0.07	0.11	-0.03
Na2O	0.23	-0.01	1	0.1	-0.07	0.22	0.3	-0.25	-0.01
MgO	-0.5	0.32	0.1	1	0.86	0.34	-0.13	0.39	0.11
K2O	-0.68	0.33	-0.07	0.86	1	0.11	-0.49	0.59	0.16
P2O5	0.32	0.03	0.22	0.34	0.11	1	0.48	-0.38	-0.25
PF	0.78	-0.07	0.3	-0.13	-0.49	0.48	1	-0.8	-0.38
SiO2	-0.98	0.11	-0.25	0.39	0.59	-0.38	-0.8	1	0.34
TiO2	-0.35	-0.03	-0.01	0.11	0.16	-0.25	-0.38	0.34	1

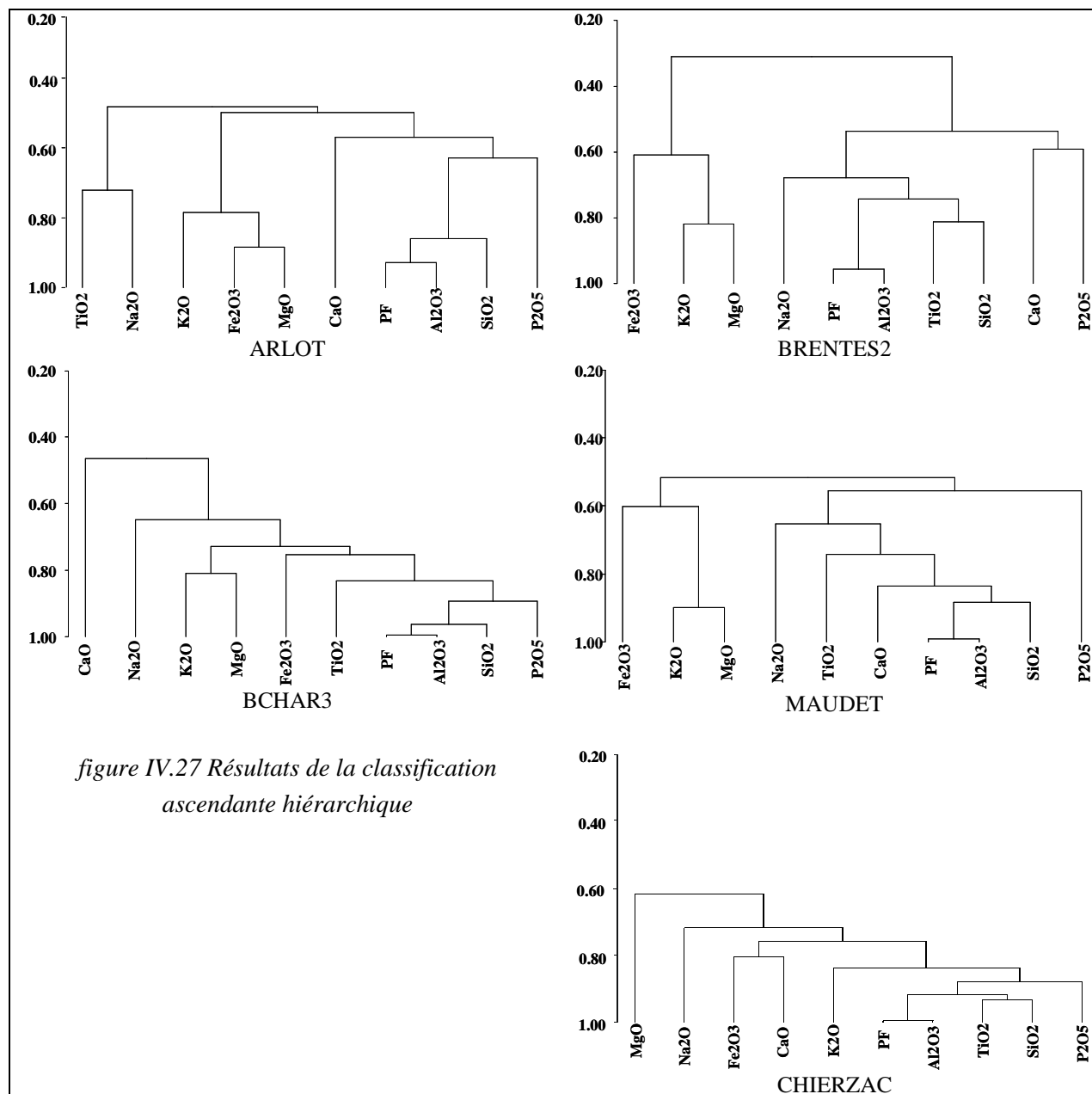
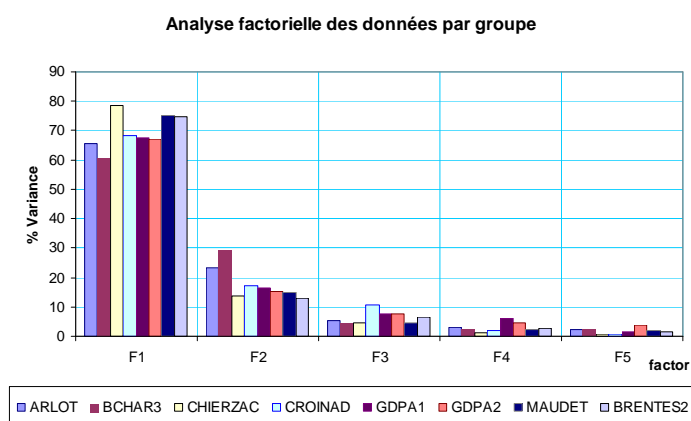


figure IV.27 Résultats de la classification ascendante hiérarchique

figure IV.28 Portion de chaque facteur dans la variance totale, calculée par l'analyse factorielle des données.



On constate sur la figure IV.29 deux groupements qui correspondent à la présence du kaolin (et de la gibbsite) et du mica, le premier est caractérisé par le regroupement de Al_2O_3 , PF et H_2O opposé au quartz et la silice. Le deuxième représente le regroupement de l'illite avec K_2O , MgO et Fe_2O_3 . Le positionnement très proche de K_2O et de l'illite provient de la méthode de calcul de la composition minéralogique. Dans les gisements plus riches, la kaolinite devient le minéral le plus fréquent, et la variation illite-kaolinite devient le changement le plus significatif dans le gisement (le poids le plus important correspond à l'illite et le K_2O dans les deux premiers facteurs pour le groupe BRENTES2 et le groupe MAUDET).

Le groupement K_2O - MgO - Fe_2O_3 s'affaiblit dans le groupe STGEORG5 et le groupe BCHAR3, l'observation sur la carrière de St.-Georges témoigne de la présence des micas parfaitement blancs.

Dans le groupe BRENTES2, la relation Al_2O_3 -PF- Kaol est plus compliquée, les variables sont plus éloignées. Cela provient d'une non linéarité plus importante entre les variables liée à la présence de la gibbsite.

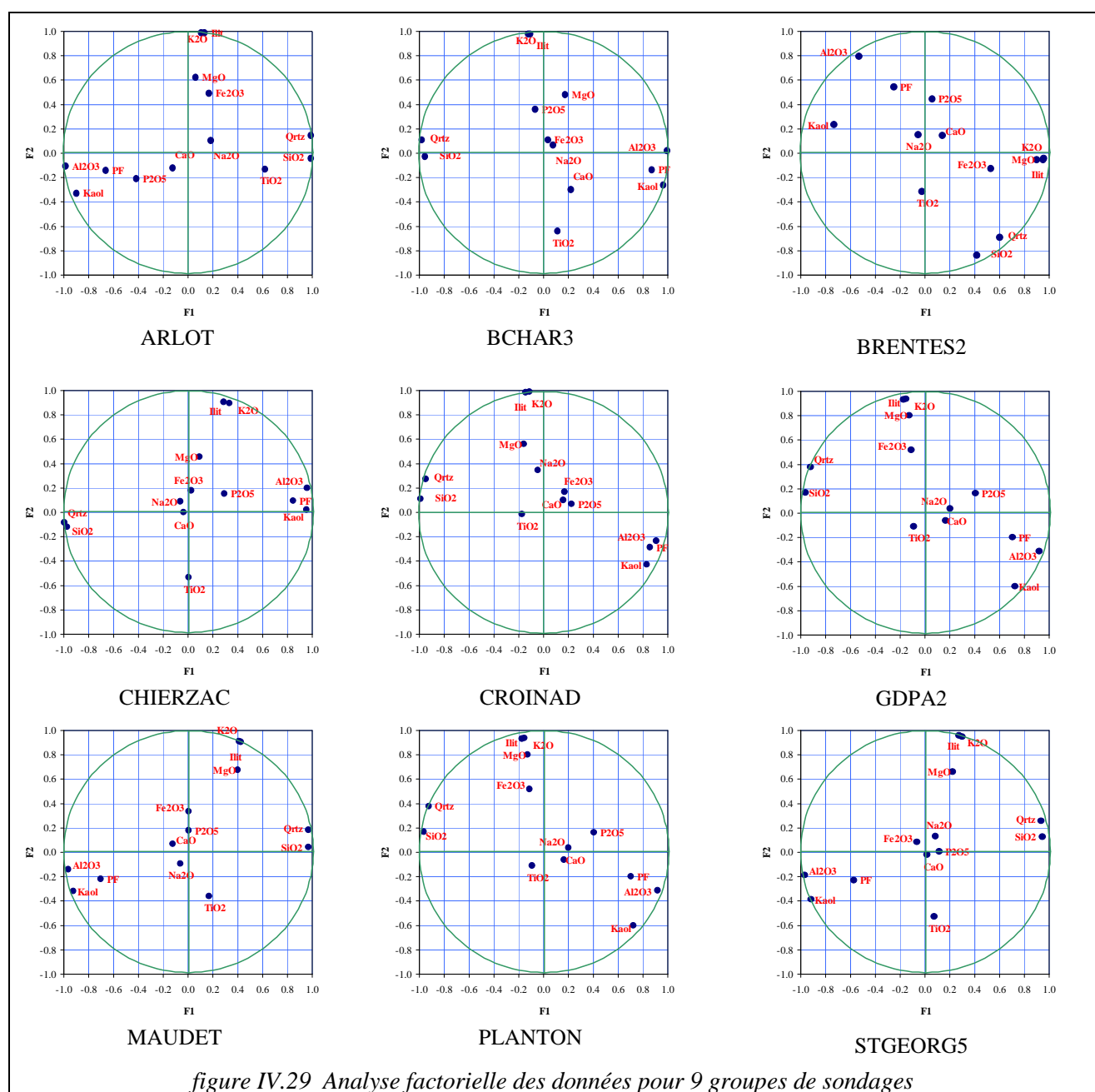


figure IV.29 Analyse factorielle des données pour 9 groupes de sondages

Comme on l'a vu précédemment, les courbes de l'histogramme des lithologies et de la teneur en Al_2O_3 se chevauchent. Ce chevauchement est encore visible sur les graphes des facteurs principaux. La variation $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ en tant que la structure plus signifiante impose la rotation des données, sur la base de cette relation. La figure IV.30 montre la valeur des deux premiers composants principaux pour les échantillons. On distingue les codes lithologiques différents par des couleurs distinctes. On pourrait comparer le nuage de corrélation $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ avec ce nuage des deux premiers facteurs.

Dans les gisements contenant des argiles pierreuseuses, les nuages des points (MAUDET et BRENTE2) sont semblables à une rotation près, aux nuages des points de la relation $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$, voir figure IV.26.

La distinction des groupes lithologique ne peut donc pas être basée sur ce critère. L'utilisation des méthodes multivariées n'a donc pas pu nous aider pour avoir un critère qui soit efficace.

Bien évidemment les méthodes de l'analyse factorielle ne sont pas très bien adaptées à la classification des données, mais elles peuvent nous montrer la relation entre les variables et la direction du maximum de la variation dans l'espace multivariable. Cette étude montre que les codes lithologiques ne représentent pas des familles ayant des compositions chimiques bien distinctes.

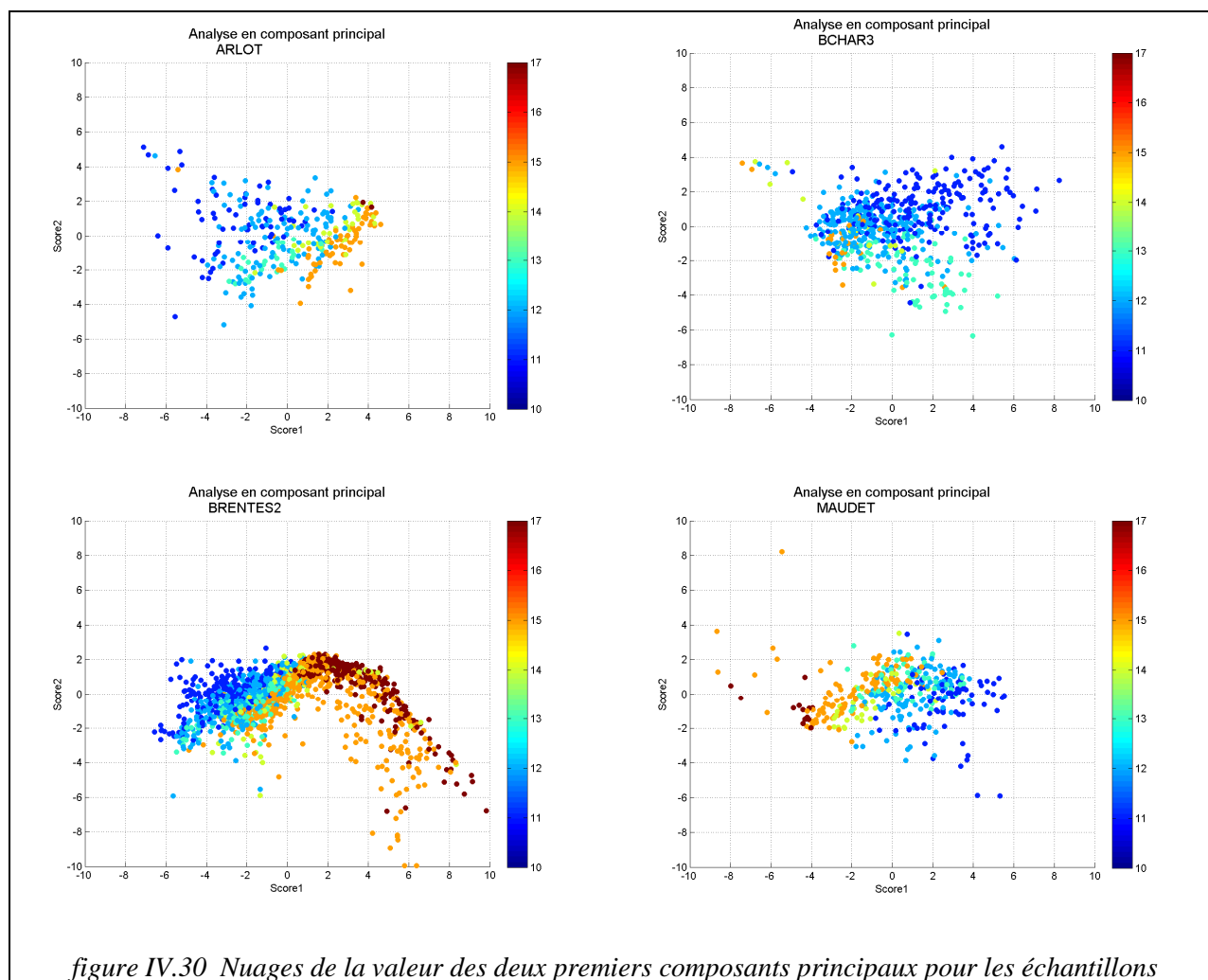


figure IV.30 Nuages de la valeur des deux premiers composants principaux pour les échantillons

IV.3.5. Classification par l'analyse discriminante

L'analyse discriminante linéaire fait partie des techniques d'analyse discriminante prédictive. Il s'agit d'expliquer et de prédire l'appartenance d'un individu à une classe (groupe) prédéfinie à partir de ses caractéristiques mesurées à l'aide de variables prédictives.

Le but de cet exercice est d'en savoir plus sur la sensibilité de la classification lithologique. Dans un premier temps, on construit les informations statistiques des classes lithologiques en utilisant leurs échantillons, ensuite on demande une reclassification des mêmes échantillons dans les classes lithologiques en tenant compte de leurs compositions chimiques. L'échantillon sera rangé dans la classe pour laquelle la probabilité d'appartenance est la plus élevée. Cette étude nous a permis de faire une comparaison entre le code lithologique donné par le sondeur et le code assigné en connaissant la composition chimique des échantillons. Dans cette étude la distance Mahalanobis (voir glossaire statistique dans B.1) est utilisée comme critère de distance.

La figure IV.31 montre le résultat du classement des échantillons pour 6 groupes de sondages.

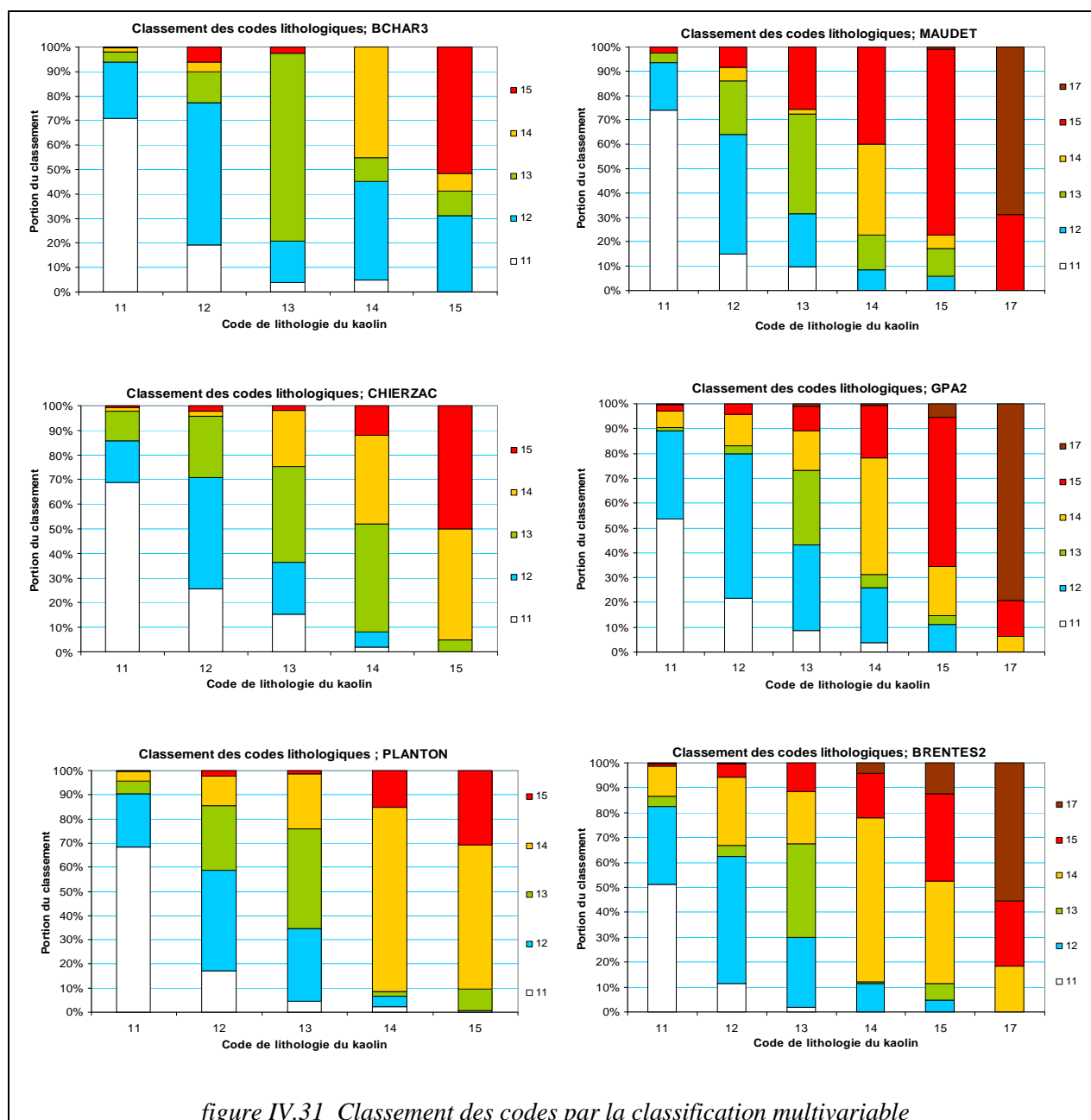


figure IV.31 Classement des codes par la classification multivariable

En conclusion les classes lithologiques d'argile kaolinique de Charentes ne présentent pas des populations statistiques très distinctes de la composition chimique des argiles, et leurs interférences restent importantes.

Dans le groupe de Maudet les échantillons de code 17 sont classés soit avec le même code soit avec le code 15. Mais dans le groupe GPA2 les argiles de code 17 peuvent être codées comme de l'argile grasse à grain (code 14). Cela montre un chevauchement plus important entre la composition chimique des argiles pierreuses et celle des argiles de code 14 en liaison avec le chevauchement de ces deux lithologies dans le gisement MAUDET. Ce chevauchement est encore plus important dans le groupe de BRENTES2.

Dans le groupe PLANTON, les deux lithologies de code 14 et de code 15 sont très confuses, Dans la groupe BCHAR3, la composition chimique de code 15 est très étendue, on trouve même une partie de ces échantillons classés comme de l'argile demi-grasse à grain. Dans le groupe CHIRZAC pour le code 13, on trouve toutes les lithologies existantes.

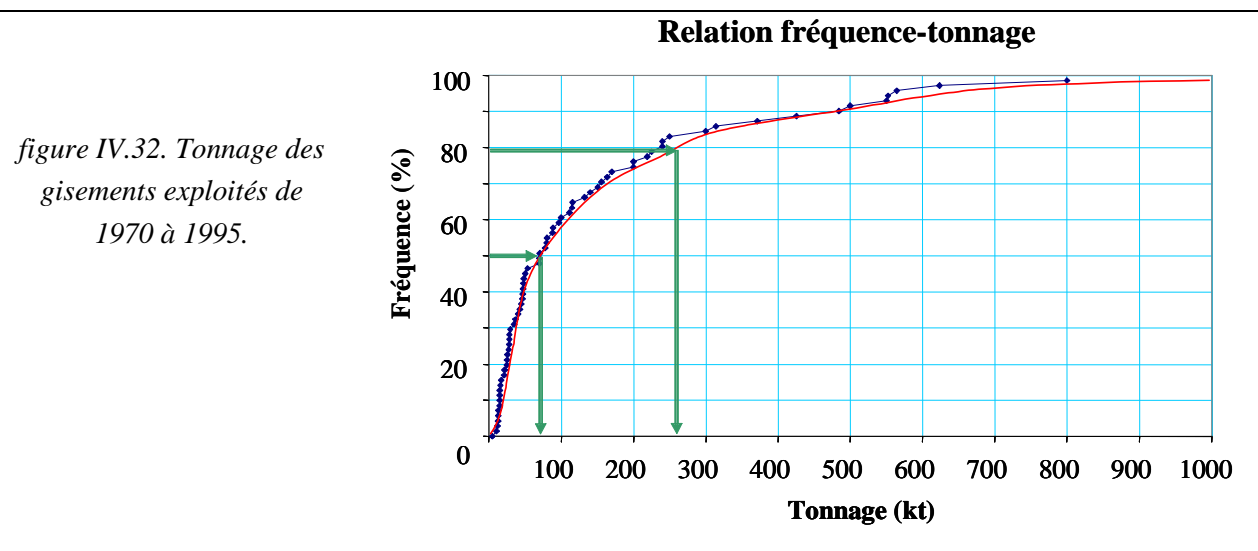
On ne trouve pas d'argiles de code 11,12 ou 13 classées comme argile pierreuse, vu la distance des moyennes de ces populations. Dans le gisement Bois des Rentes (BRENTES2) la distinction d'argile grasse (code 15) s'avère très difficile surtout d'avec l'argile demi-grasse à grain et l'argile pierreuse. Mais dans le gisement Grand Pas2 (GDPA2), et surtout Maudet, une grande partie des échantillons d'argile grasse se montre plus proche au centre statistique issu de tous les échantillons de même code. Les argiles grasses dans le gisement de BDR sont très riches (en alumine et en PF) du fait de l'interférence plus importante entre les codes 15 et 17 dans ce gisement.

IV.3.6. Continuité spatiale

La forme des lentilles d'argile est variée et complexe, il est donc difficile de déduire leurs géométries par une simple série de dimensions. La possibilité d'avoir, des séquences différentes de kaolin et des superpositions de lentilles de formes différentes, sont les facteurs qui compliquent la tâche de description géométrique des lentilles d'argile.

Pour contourner partiellement ce problème, on peut utiliser le tonnage des lentilles d'argile dans les gisements comme outil de pilotage de prospection, voire d'exploitation. La figure IV.32 montre le tonnage des gisements exploités de 1970 à 1990. Cette figure montre que les gisements très grands sont rares, que 50 % des gisements ont un tonnage inférieur à 75 kt et que 80 % ont des réserves de moins de 260 kt.

Ce genre d'information pourrait être utilisé comme le paramètre de prospection, à l'échelle du bassin. Les gisements actuellement en exploitation, sont plus grands et plus continus que les gisements anciens situés à la bordure du bassin, sous une faible couverture.



L'épaisseur du dépôt d'argile kaolinique varie de quelques dizaines de centimètres à une trentaine de mètres dans les chenaux (25 m dans le gisement BDR) ou les dépôts en "boule".

Nous avons déjà signalé que la taille des échantillons varie, même dans les zones homogènes. On pourra également avoir deux ou plusieurs échantillons successifs ayant le même code lithologique. La figure IV.33 montre la distribution de la puissance cumulée dans le gisement BDR. L'argile maigre n'est pas très continue dans la direction verticale, tandis que les argiles pierreuses et les argiles grasses sont en général plus épaisses. Ces argiles sont en général échantillonnées en passes plus importantes. Les argiles ligniteuses ont une épaisseur très variable dans le gisement.

Les changements horizontaux dans la qualité de l'argile rendent très difficile la tâche de l'interpolation entre les couches d'argile. Ces changements sont imposés d'une part, par les phénomènes post-sédimentations et d'autre part par les déformations de la géométrie initiale des dépôts par la compaction importante des lentilles d'argile et le soutirage karstique. Même les surfaces conductrices (englobant les séquences kaoliniques) qui prennent en compte la forme des couches d'argiles ne permettent pas toujours de rendre compte de la continuité lithologique du kaolin (les codes lithologiques du kaolin).

La continuité spatiale des éléments sera étudiée au moyen du variogramme dans le chapitre V. Dans le chapitre VI, on examinera la continuité des faciès et la possibilité d'application d'un outil mathématique pour interpoler les lithofaciès.

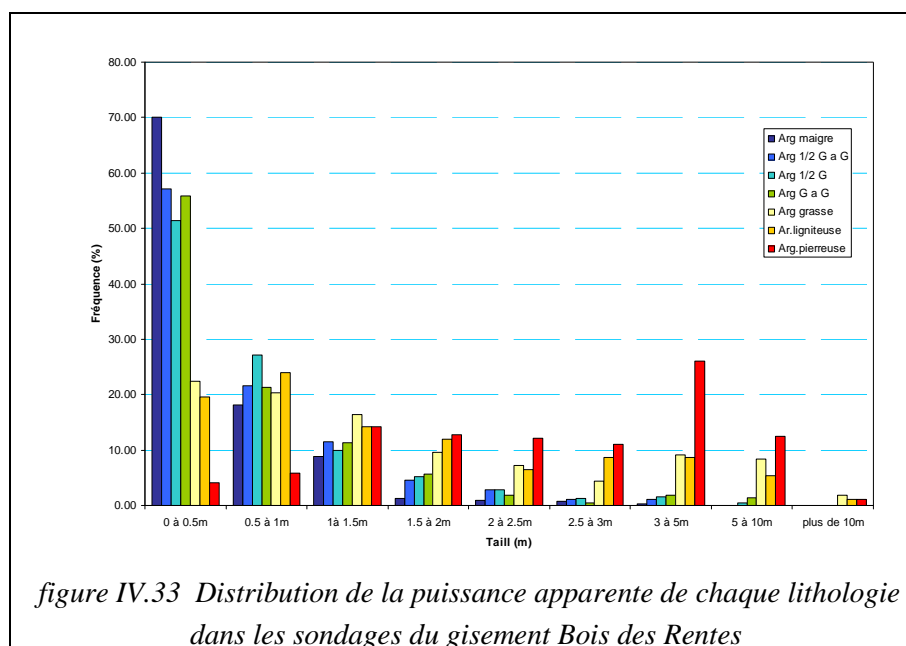


figure IV.33 Distribution de la puissance apparente de chaque lithologie dans les sondages du gisement Bois des Rentes

IV.4. Conclusion

Le résultat de l'étude statistique présentée dans ce chapitre peut être résumé de la façon suivante :

- On constate une variation significative de la composition lithologique des gisements. Il en est de même de leurs compositions chimiques, les gisements situés au centre du secteur de Guizengeard loin des bordures du bassin se montrent plus riches en argile pierreuse et aussi en général plus riche en argile hyperalumineuse.
- Les codes lithologiques sont assez utiles pour une description sédimentologique des dépôts d'argiles, mais ils ne sont pas suffisamment précis pour être représentatifs des classes chimiques nécessaires à une grille de classifications de réserves.
- Les schémas avec les codes lithologiques des logs peuvent être très utiles en tant qu'informations complémentaires aux valeurs fournies par les analyses chimiques, mais le code lithologique, en soi, ne renseigne pas sur la présence de minéraux accessoires.
- La moyenne et la variance de l'alumine (le premier critère de classement des réserves) à l'intérieur des codes lithologiques varient selon le type du gisement : 3 ou 4 groupes principaux sont reconnaissables selon ces critères et la distribution de la teneur en alumine.
- Dans les gisements ayant subi une altération plus avancée marquée par la présence de gibbsite ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 46\%$), on observe un décalage de la moyenne de chaque lithologie vers les valeurs plus élevées. On observe aussi des formes bi ou multimodales de la distribution de la teneur en alumine. Ceci montre que ce phénomène a une portée plus grande, et il ne se limite pas seulement aux poches d'argile pierreuse. On observe

également qu'une argile maigre située juste au dessous des argiles hyperalumineuses, peut aussi être enrichie en alumine.

- L'augmentation de la variance est le paramètre le plus important et le plus difficile à gérer. Pour l'exploitant il n'est pas très difficile de s'adapter à une augmentation ou une baisse de la moyenne présumée pour chaque groupe lithologique mais il est difficile de s'adapter à une variation de variance.
- La présence des matières organiques et/ou de l'humidité peut donner une appréciation différente de l'échantillon (affectation d'un code lithologique) en comparaison avec l'échantillon qui est resté quelques temps exposé devant le soleil. Il en est de même pour l'évaluation de la couleur des échantillons.
- Les codes lithologiques ne rendent pas compte de la présence de mica, de pyrite, de gibbsite et de smectites dans les échantillons. Les argiles pierreuses sont généralement pauvres en quartz et en mica.
- La variation illite-kaolinite-gibbsite est la plus importante à l'échelle du bassin, et aussi à l'échelle des gisements. Une partie de la variation du MgO et du Fe_2O_3 est en liaison génétique avec la teneur en K_2O . Ces éléments sont les composants d'une illite sous forme de Phengite. Les teneurs en oxyde de titane, en Na_2O et P_2O_5 n'apparaissent pas significativement corrélées avec les autres variables et ni entre elles.
- La présence du mélange de familles différentes diminue la qualité de la corrélation entre l'estimé et le réalisé. Ce fait peut être observé aussi sur les poids des variables dans l'analyse ACP et l'analyse factorielle.
- Les argiles classées en code 17 ou 15 (pierreuses ou grasses) sont plus épaisses que les argiles dites maigres ou demi-grasses. On verra plus tard, les critiques sur l'échantillonnage avec des tailles différentes, basées sur l'hypothèse d'homogénéité à l'intérieur d'une lithologie.
- Cette étude montre clairement une variation de la composition chimique des minéraux des kaolins, par exemple, la différence de la composition du mica, entre les micas des gisements riches et ceux des gisements moins riche en alumine. Une variation de la cristallinité des kaolinites est mentionnée dans les bibliographies. Ces variations doivent être prises en compte pour améliorer la prévision de la qualité des produits. Dans le cadre de ce travail on se concentre sur l'amélioration de la qualité d'estimation in-situ de la composition chimique des kaolins, qui sera le sujet des prochains chapitres

V. ESTIMATION DE LA QUALITE DES KAOLINS DES GISEMENTS DU BASSIN DES CHARENTES

On constate des différences entre l'estimé et le réalisé et on observe une régionalisation des données, il était donc raisonnable de penser à la géostatistique.

Rappelons que la géostatistique est née suite aux études de Krige sur les problèmes d'exploitations minières, puis développée par le professeur Matheron.

Les méthodes géostatistiques sont les méthodes les plus importantes de l'estimation et l'évaluation des ressources naturelles. L'utilisation de ces outils est peu mentionnée dans le cadre des minéraux industriels, elle l'est encore moins dans le cas du kaolin.

On montrera dans ce chapitre que l'on peut utiliser la géostatistique dans le cadre des gisements sédimentaires des kaolins des Charentes.

Dans une première partie on analyse l'adaptabilité des données disponibles pour les méthodes géostatistiques.

On a vu que, dans les gisements riches, la variance en Al_2O_3 (premier critère de la classification) est plus importante que dans les gisements anciens (moins riches en Al_2O_3). Une étude comparant les variogramme horizontaux des différents gisements des Charentes permet de démontrer une variance plus importante dans ces gisements aux courtes distances. .

Les avantages de l'utilisation des méthodes géostatistiques sont décrits, et à titre d'exemple, l'utilisation du modèle de variogramme ajusté pour optimiser la maille de reconnaissance, pour atteindre à une limite de précision souhaitée, est expliquée, et illustrée dans deux cas (Gisement BDR et St.Georges) qui sont comparés.

Le gisement Bois Des Rentes est un des plus grands gisements d'AGS, une partie de ce chapitre est consacrée à son estimation.

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente des travaux d'estimation de divers gisements d'argile kaolinique des Charentes, par des techniques de géostatistique. Les principes de la géostatistique linéaire sont présentés dans l'annexe A, et certaines références sont proposées.

Dans un premier temps, après une présentation des problèmes concernant l'application de la géostatistique au cas des gisements d'argile, on essaye d'évaluer leurs impacts sur le variogramme et l'estimation des gisements.

La deuxième partie porte sur l'usage des outils de la géostatistique pour mieux gérer les ressources. Il s'agit de la compréhension de la variabilité spatiale des variables chimiques, et de la comparaison de leurs structures dans les différents gisements du bassin des Charentes. Cette phase d'étude se termine par la définition de la maille de sondage optimale pour l'estimation de ces gisements. En dernier lieu, une comparaison est effectuée entre les résultats obtenus par krigeage et ceux donnés par la méthode actuelle.

La fin du chapitre est consacrée à l'estimation du gisement de Bois Des Rentes (BDR). Ce gisement est un des plus grands gisements d'AGS. Comme exposé dans le chapitre précédent, la teneur en alumine y est très variable.

V.2. Problème d'estimation

Un obstacle important dans l'adaptation de la géostatistique aux applications pratiques dans l'exploration, l'évaluation, et l'extraction globales des gisements d'argiles est constitué par les cadres théoriques rigoureux auxquels le terme géostatistique renvoie. Pour que l'utilisation d'outils de la géostatistique devienne possible pour les exploitants sans violer les principes sur lesquels la géostatistique se fonde, est instauré un protocole décrivant les processus d'acquisition des données, et de leur traitement.

Malgré l'utilisation très fréquente des méthodes géostatistiques dans le domaine de l'estimation de réserves minières, les articles publiés sur l'utilisation critique de ces outils ne sont pas très fréquents.

V.2.1. Variable additive

Les variables non-additives sont l'objet d'une considération importante dans les applications de la géostatistique. Pour que le calcul d'un variogramme ou d'une régularisation ait un sens il faut que la variable régionalisée réponde à certaines règles comme la règle d'additivité : une variable régionalisée est dite additive si toute combinaison linéaire de ses valeurs garde la même signification ou le même sens physique (Journel 1978, Deutsch 1992 et Denis et al 1997).

Hack (2003) dans son article sur l'utilisation de la géostatistique pour les gisements de sable et de gravier cite ce problème pour les données granulométriques et d'autres paramètres utilisés dans le secteur des agrégats. Certaines de ces variables sont explicitement non-additives, par exemple :

- La fonction de forme exprimée par $f = \sqrt{[(D_{25} \times D_{75}) / (D_{50})^2]}$;
- Le coefficient de gradation du sol exprimé par $C_g = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$.

Il existe d'autres variables qui ne sont pas évidemment non-additives par leur forme mathématique, mais elles le sont, dans le contexte de l'évaluation géostatistique. Des qualités comme l'usure de Los Angeles et la longévité gel-dégel sont des variables de ce genre.

Non seulement existe-il un défi sur la création d'une transformation mathématique appropriée, mais encore en s'assurant également que les applications de ces derniers variables transformées conviennent en ce qui concerne d'autres limitations mathématiques.

Peroni et al. (1999) fournissent un traitement intelligent de l'évaluation géostatistique des variables non-additives dans un gisement de kaolinite. Spécifiquement, ils emploient la fonction de Kubelka-Munk

pour créer une transformation non-linéaire de l'indice de blancheur qui est un paramètre primordial de contrôle de la qualité et de l'évaluation des gisements de kaolin. Son utilisation évite de biais dans le modèle d'estimation des réserves par blocs, les résultats de la validation-croisée se montrent excellents.

Stangler et al. (2002) ont utilisé l'adsorption de l'eau et le retrait linéaire pour modéliser un gisement du kaolin au Sud-est du Brésil.

Comme on a vu dans II.5.3.2, la composition chimique des échantillons de kaolin est mesurée sur le kaolin calciné (on l'appelle ici, la teneur mesurée ou la teneur calcinée). La teneur mesurée n'est pas additionnable pour la réserve in-situ, car dans le gisement la part au feu est comprise dans la masse ou volume des échantillons ou des blocs. Cela doit être pris en compte pour le calcul de la moyenne de la teneur du mélange. On les explique par les équations suivantes ;

$$TB_1 = \left(\frac{TC_1 * (100 - PF_1)}{100} \right)$$

$$TB_2 = \left(\frac{TC_2 * (100 - PF_2)}{100} \right)$$

$$M = m_{\text{mélange}} = m_1 + m_2$$

$$TB_{\text{mélange}} = \frac{m_1 * TB_1 + m_2 * TB_2}{M}$$

$$PF_{\text{mélange}} = \frac{m_1 * PF_1 + m_2 * PF_2}{M}$$

$$TC_{\text{mélange}} = \frac{TC_{\text{mélange}} * 100}{(100 - PF_{\text{mélange}})}$$

m_1 : la masse de bloc 1

m_2 : la masse de bloc 2

PF_1, PF_2 : leurs pertes au feu

TC_1 et TC_2 ; les teneurs mesurées après calcination

TB_1 et TB_2 sont les teneurs brutes

Si $m_1 = m_2$

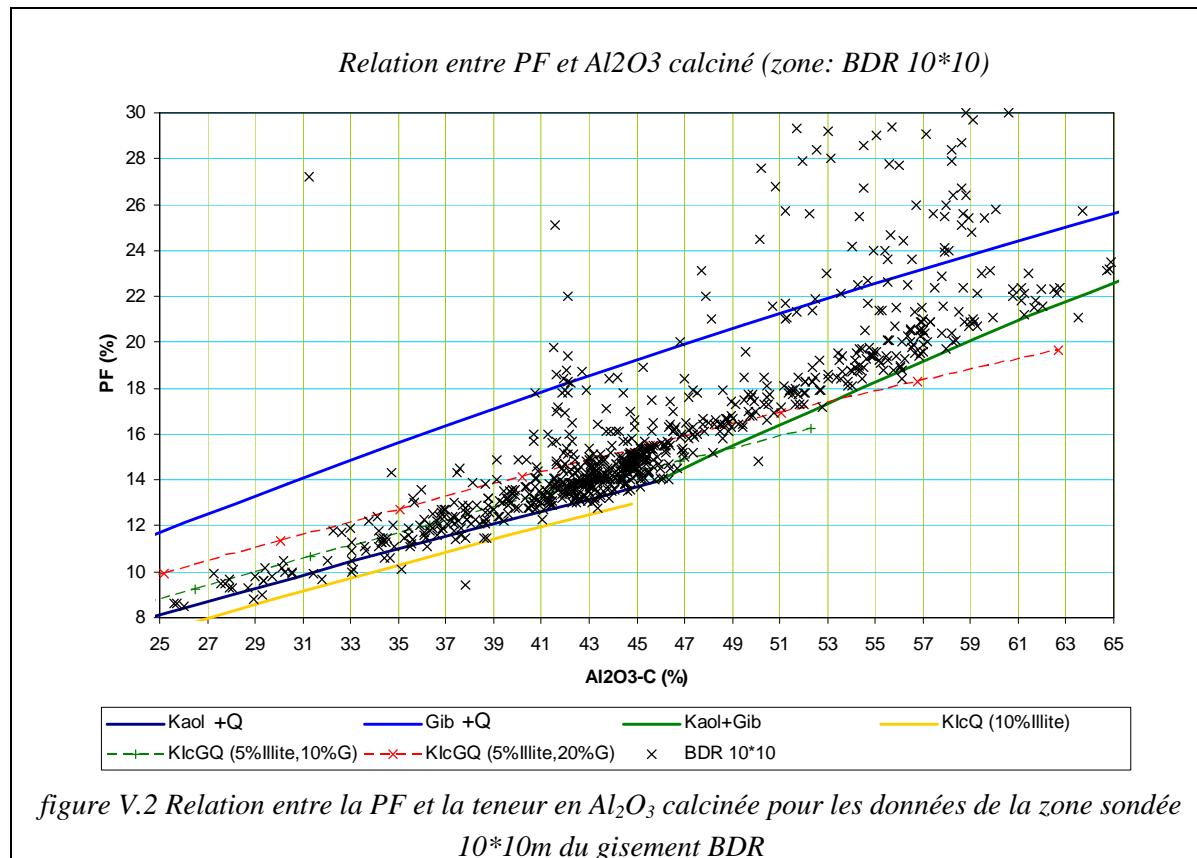
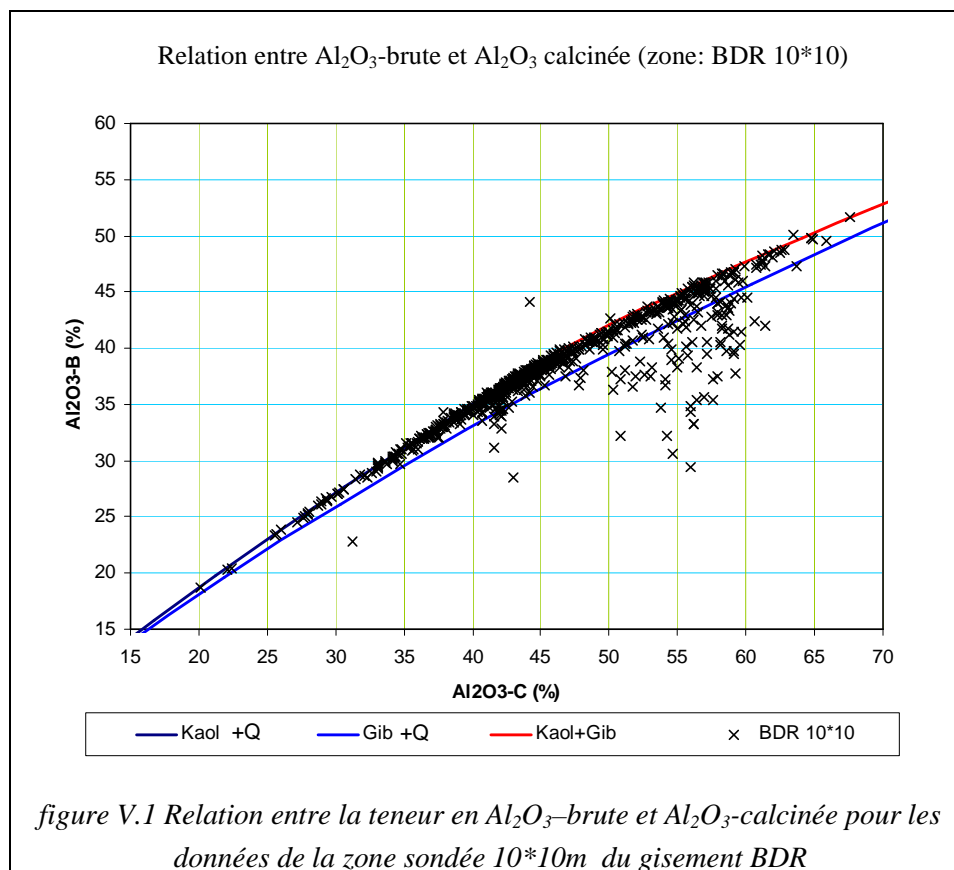
$$TC_{\text{mélange}} = \frac{TC_1 * (100 - PF_1) + TC_2 * (100 - PF_2)}{(100 - PF_1) + (100 - PF_2)}$$

$$TC_{\text{mélange}} \neq \frac{TC_1 + TC_2}{2}$$

L'équation de calcul de la teneur moyenne (le cas $m_1 = m_2$) illustre très bien la non additivité de la teneur calcinée, sauf dans le cas où l'on a une perte au feu très proche, la moyenne mathématique de deux teneurs peut donner une approximation acceptable de la vraie teneur du mélange.

La figure V.1 montre la relation entre la teneur brute et la teneur calcinée en Al_2O_3 des échantillons d'une zone récemment sondée sur une maille de 10*10m dans le gisement BDR. La courbe des différentes compositions minéralogiques est également tracée. La courbure (non linéarité) de la gibbsite n'est pas très importante. Les échantillons suivent la courbe de la kaolinite et de la kaolinite-gibbsite (voir aussi figure V.46). Il existe des échantillons qui montrent une teneur brute en Al_2O_3 moins importante que celle des compositions minéralogiques idéales (les points situés au dessous de la courbe de la gibbsite). Ces échantillons sont en général riches en matière organique, ce qui augmente la PF. Un changement de la tendance peut être constaté sur le nuage des points représentable par la courbe de la kaolinite et celle de la kaolinite-gibbsite.

La figure V.2 présente la relation entre la perte au feu PF et l'alumine calcinée pour la zone étudiée figure V.1. On peut comparer la composition de chaque échantillon avec les diverses compositions minéralogiques. Le calcul de la composition d'Illite (Ic) est basé sur la formule chimique parue dans le mémoire de Delineau (1994).



La corrélation linéaire forte entre les variables impose la proportionnalité entre leurs variogrammes (leurs modèles de covariance). Le modèle de covariance proportionnel est le modèle multivariables le plus simple utilisé en géostatistique (Chilès et Delfiner 1999). Toutes les covariances (variogrammes) sont proportionnelles à la même fonction de covariance (variogramme) :

$$C_{ij}(h) = b_{ij} C(h) \text{ ou } \gamma_{ij}(h) = b_{ij} \gamma(h)$$

Ce modèle, corrélation dite intrinsèque (Rivoirard 2003), a été utilisé par Matheron (1965), afin de valider le coefficient de la corrélation statistique. Les poids du krigeage sont indépendants de la valeur du palier, donc si les variables sont intrinsèquement corrélées (ont le même modèle de variogramme), on aura les mêmes poids de krigeage. Cela simplifie le processus d'estimation mais ne peut pas assurer que la valeur de l'estimation directe d' Al_2O_3 -calcinée soit égale à la teneur réelle calculée en divisant la valeur estimée d' Al_2O_3 -brute par le reste de la perte au feu. Les équations ci-après expliquent la différence entre les résultats de ces différentes méthodes.

La corrélation est plus forte dans le cas d'utilisation de l'accumulation de la teneur à l'échelle du gisement. Dans le cas des gisements de kaolins, où la variation verticale est plus importante que la variation horizontale, l'accumulation sera plus sensible à la variation de l'épaisseur qu'à celle de la teneur. Ce qui veut dire que la moyenne de la teneur (accumulation totale divisée par l'épaisseur) reste moins variable.

Certains échantillons riches en matière organique sont à l'origine de la corrélation moins forte entre l'épaisseur et l'accumulation de la perte au feu (figure V.3.a en comparaison avec figure V.3.b et avec figure V.3.c). Les mêmes points se manifestent en étant également écartés de la ligne de tendance dans le graphe du nuage de dispersion de l'accumulation d' Al_2O_3 calcinée en fonction de l'accumulation de la perte au feu (figure V.3.d), et dans celui du nuage de dispersion de l'accumulation d' Al_2O_3 brute en fonction de l'accumulation de la perte au feu (figure V.3.e).

Tant que les données restent proches la différence entre les résultats de ces méthodes est faible. Il est difficile de donner une règle générale pour définir les conditions dans lesquelles la différence reste acceptable.

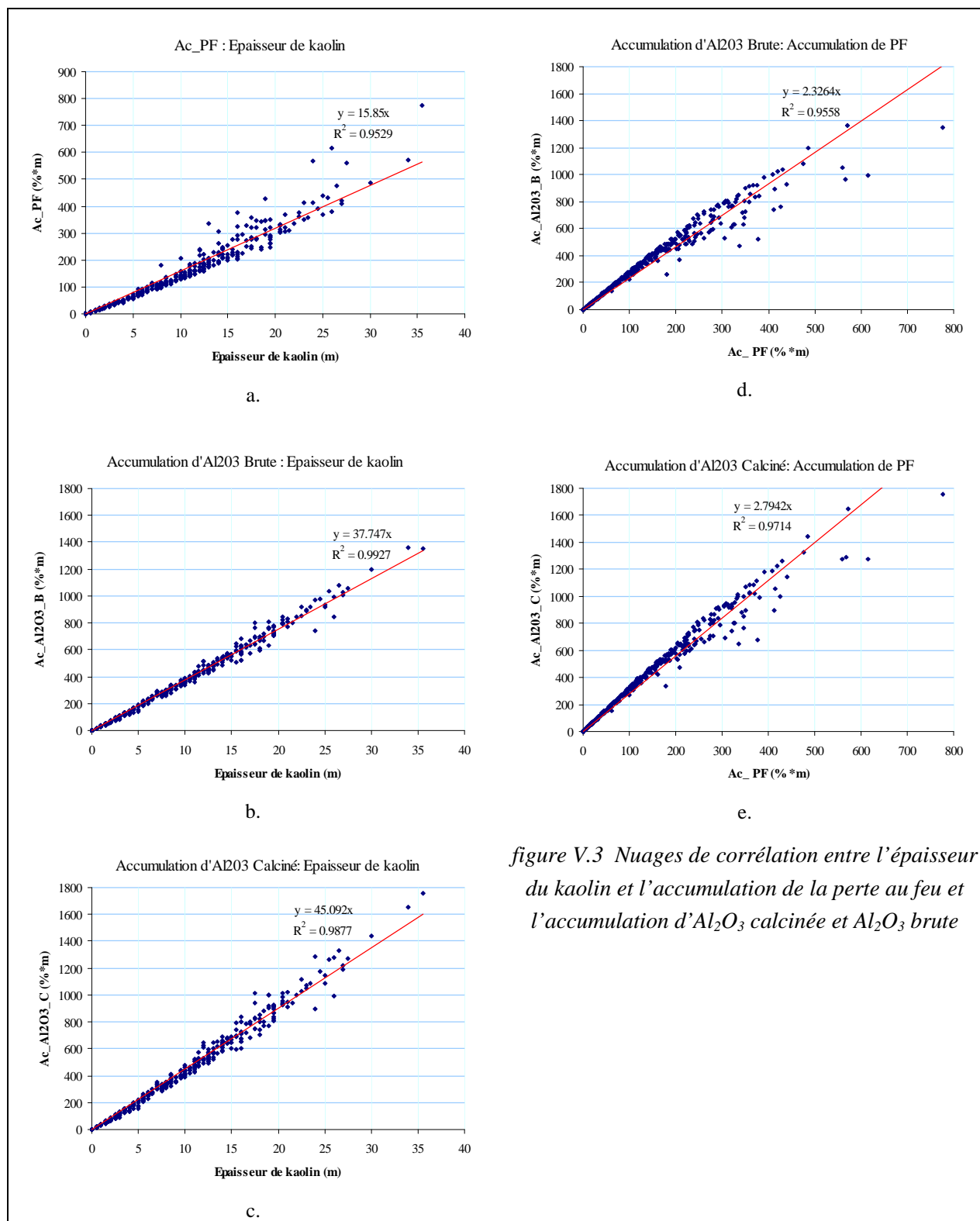


figure V.3 Nuages de corrélation entre l'épaisseur du kaolin et l'accumulation de la perte au feu et l'accumulation d'Al₂O₃ calcinée et Al₂O₃ brute

$$Al_2O_3^C = \frac{Al_2O_3^B}{(1-PF)}; \text{ Le reste de la perte au feu est présenté par } (1-PF)$$

La teneur estimée est la moyenne pondérée des teneur des données voisines :

$$Al_2O_3^{B*} = \sum \lambda_i (Al_2O_3^B)_i$$

$$PF^* = \sum \lambda_i (PF)_i; (1-PF)^* = \sum \lambda_i (1-PF)_i$$

$$si: \left\{ \begin{array}{l} Al_2O_3^C = a(1-PF) + b \Rightarrow Al_2O_3^B = a(1-PF)^2 + b(1-PF) \\ \sum \lambda_i = 1 \end{array} \right\}$$

Calcul de la teneur en $Al_2O_3^C$

en utilisant le teneur krigée en $Al_2O_3^B$ et en $(1-PF)$:

$$Al_2O_3^{C*} = \frac{Al_2O_3^{B*}}{(1-PF)^*} = \frac{\sum \lambda_i (Al_2O_3^B)_i}{\sum \lambda_i (1-PF)_i} = \frac{\sum \lambda_i (a(1-PF)_i^2 + b(1-PF)_i)}{\sum \lambda_i (1-PF)_i}$$

$$= \frac{a \sum \lambda_i (a(1-PF)_i^2) + b \sum \lambda_i (1-PF)_i}{\sum \lambda_i (1-PF)_i} = a \frac{\sum \lambda_i (1-PF)_i^2}{\sum \lambda_i (1-PF)_i} + b$$

Krigeage direct de la teneur en $Al_2O_3^C$:

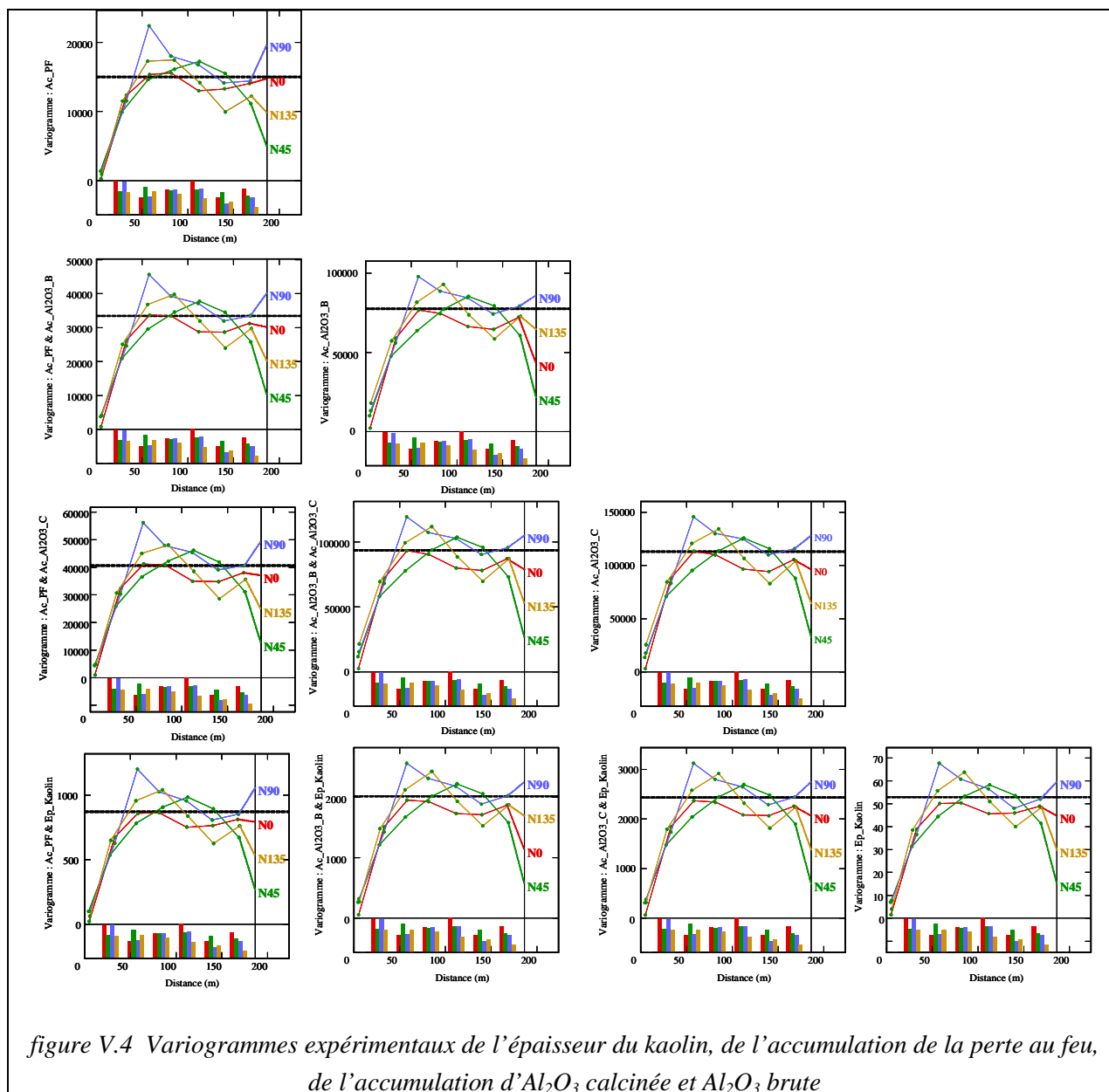
$$\sum \lambda_i (Al_2O_3^C)_i = \sum \lambda_i [a(1-PF)_i + b] = a \sum \lambda_i (1-PF)_i + b \sum \lambda_i$$

$$\sum \lambda_i (Al_2O_3^C)_i = a \sum \lambda_i (1-PF)_i + b$$

$$\frac{\sum \lambda_i (1-PF)_i^2}{\sum \lambda_i (1-PF)_i} \neq \sum \lambda_i (1-PF)_i$$

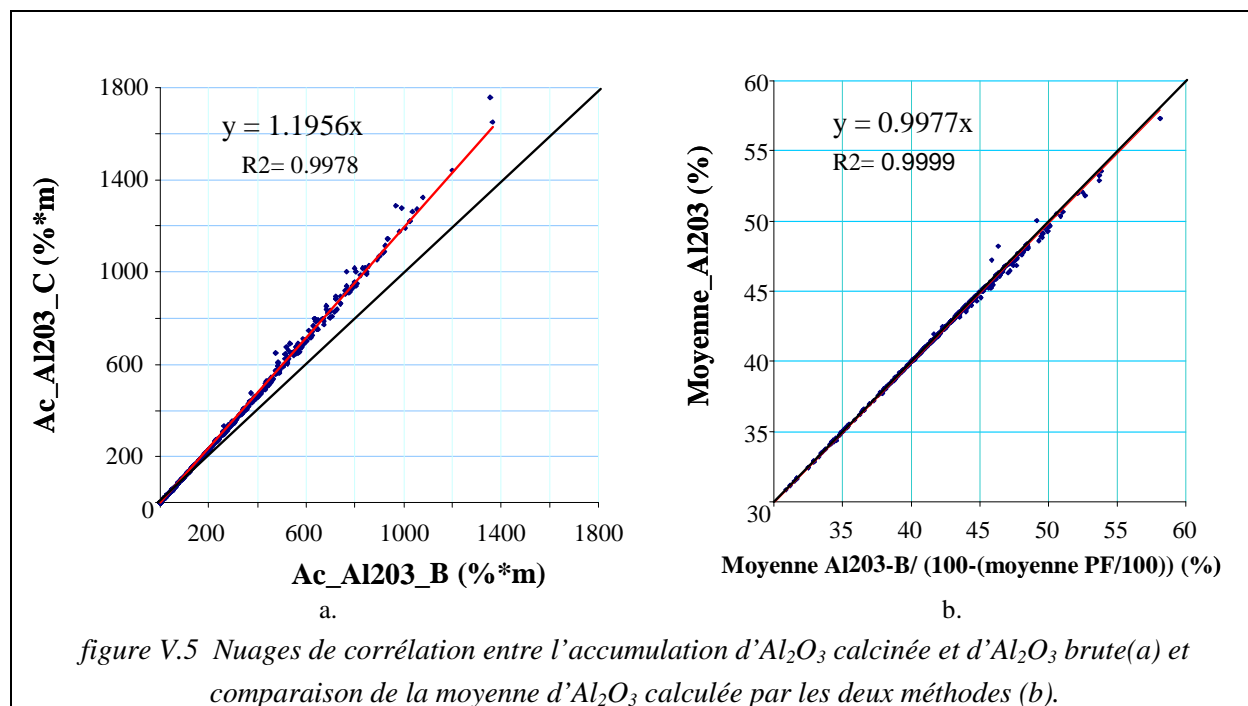
Les variogrammes expérimentaux de ces variables sont présentés dans la figure V.4. Les variogrammes sont calculés sur les quatre directions principales (0, 45, 90 et 135 degrés par rapport au Nord), le pas des variogrammes est de 28m et la tolérance angulaire est de 10°. Tous les variogrammes simples et croisés se ressemblent, il est possible de les ajuster sur un modèle de base unique.

La moyenne de la teneur en Al_2O_3 calcinée, peut être calculée grossièrement par la méthode de la moyenne pondérée par l'épaisseur des échantillons, ce qui est le résultat de la division de son accumulation par l'épaisseur de kaolin. Pour avoir une estimation non-biaisée de la moyenne, il est plus convenable de calculer tout d'abord, la moyenne d' Al_2O_3 brute, et la moyenne de la perte au feu (moyenne pondérée par l'épaisseur). La moyenne d' Al_2O_3 calcinée peut être calculée en utilisant la moyenne de la perte au feu et la moyenne d' Al_2O_3 brute. La figure V.5.a montre la corrélation linéaire entre l'accumulation d' Al_2O_3 calcinée et d' Al_2O_3 brute. L'accumulation d' Al_2O_3 calcinée est très bien illustrée par l'accumulation d' Al_2O_3 brute, une simple relation linéaire de l'accumulation d' Al_2O_3 brute est largement suffisante pour présenter l'accumulation d' Al_2O_3 calcinée.

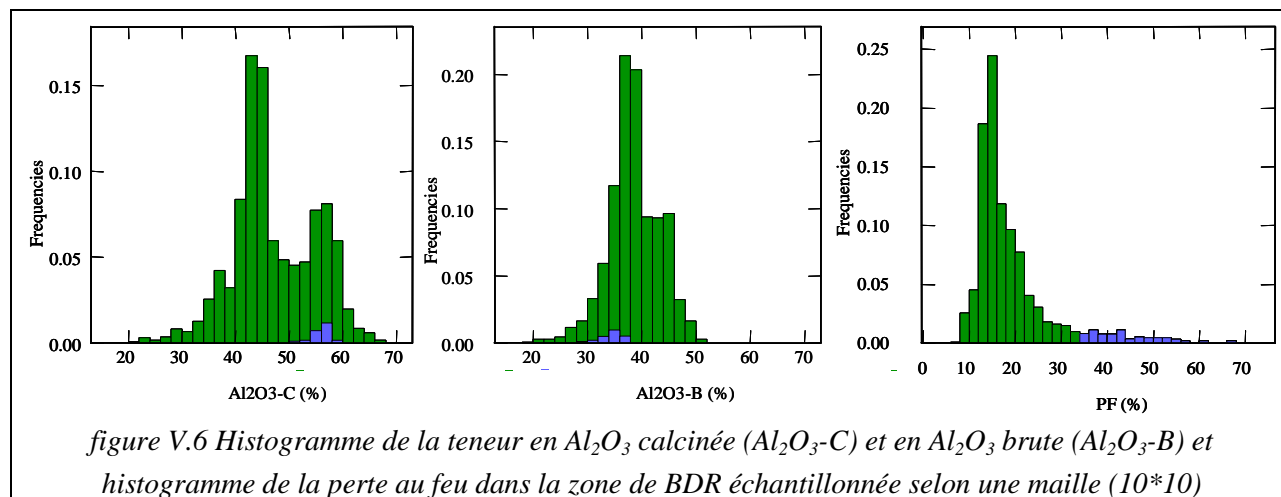


La figure V.5.b présente la teneur moyenne d'alumine calcinée calculée par les deux méthodes exposées ci-dessus. Une très forte corrélation entre les résultats de ces deux méthodes montre que l'estimation directe de la moyenne d' Al_2O_3 de chaque sondage peut être considérée comme l'estimateur idéal de la valeur réelle moyenne. La pente de corrélation est très proche de 1 (l'estimateur idéal) avec une dispersion très faible autour de la ligne de tendance.

La figure V.6 montre l'histogramme de la perte au feu et d' Al_2O_3 (calcinée et brute) pour une zone du gisement BDR échantillonnée à un maille de 10m. Les échantillons ayant une valeur très élevée de la perte au feu ($\text{PF} > 34\%$, la perte au feu de la gibbsite est 34.6% donc la teneur en PF supérieure à 34% ne peut pas être expliquée seulement par la déshydratation des silicates) sont présentés sur les trois histogrammes de couleur bleue. L'histogramme de la perte au feu montre une distribution symétrique pour les valeurs moins importantes ($\text{PF} < 30\%$). Cette distribution est suivie par une série d'échantillons à très forte valeur en PF.



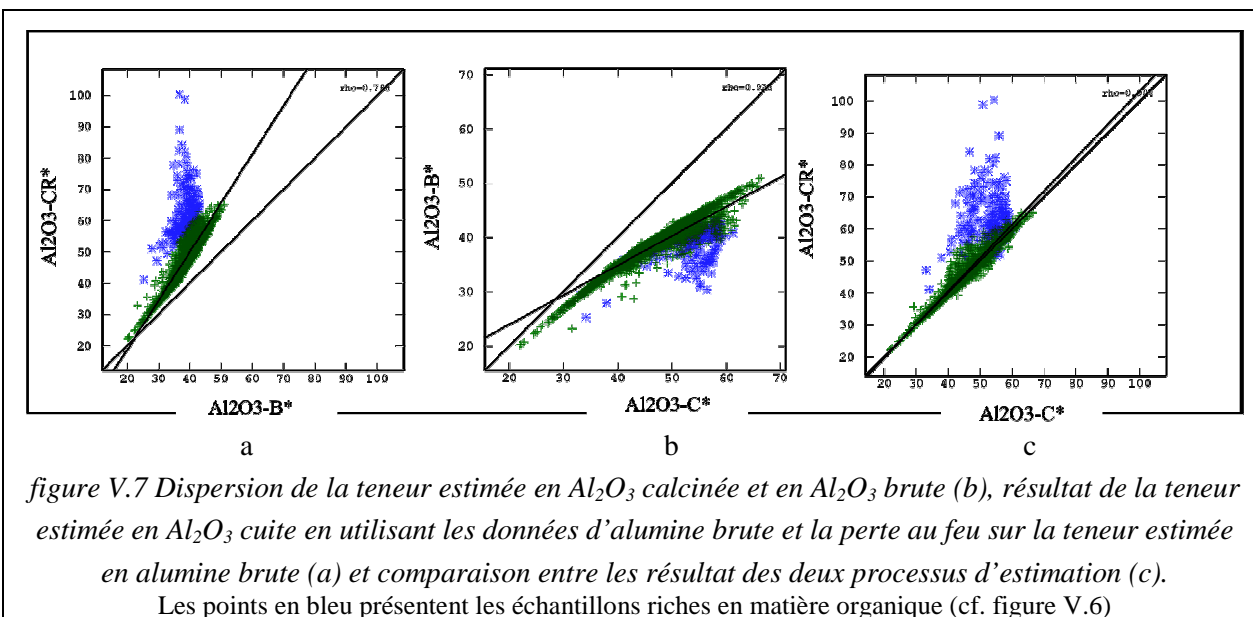
L'histogramme de la teneur mesurée en Al_2O_3 (Al_2O_3 calcinée) montre une forme bi/pluri modale, avec deux pics plus distincts, le premier centré sur 43% d' Al_2O_3 , et le deuxième situé vers 57% d' Al_2O_3 . Les échantillons riches en PF (la présence de la matière organique) se trouvent au sein de la distribution de ce dernier. En revanche la forme bimodale de la distribution est moins distincte pour la teneur en Al_2O_3 brute. Comme conséquence de leurs valeurs très élevées en PF, la teneur en Al_2O_3 brute des échantillons diminue du fait de la définition mathématique de cette variable ($Al_2O_3-B = Al_2O_3-C * [1 - (PF/100)]$).



Remarque : Pour certains échantillons, seule la valeur de PF est mesurée, du fait de la perte au feu très élevée des argiles colorées en gris, ou en brun, ou pour les argiles ligniteuses. Pour certaines argiles très maigres seule la valeur de la PF et le refus au tamis sont disponibles.

Les résultats des deux méthodes d'estimation de la teneur en Al_2O_3 , manifestent une bonne corrélation ($r=0.90$). Le diagramme de dispersion d' Al_2O_3 -brute en fonction d' Al_2O_3 -calcinée ressemble au diagramme de dispersion des données de sondages (figure V.1). On constate une incohérence entre les résultats des deux méthodes d'estimation pour les échantillons riches en matière organique : les étoiles en bleu montrent une teneur très élevée en PF ($PF^* > 34\%$; en sachant que le maximum d' Al_2O_3 mesuré est 67%, avec un maximum de PF provenant des silicates ne dépassant pas 24%). En masquant ces blocs, le

coefficient de corrélation entre ces variables atteint 0.97, et la pente de la ligne de régression s'approche de 1 (0.996 en comparaison avec la pente pour tous les blocs qui était de 1.04). En plus l'ordonnée à l'origine de la droite de régression s'approche de 0.



On constate des valeurs aberrantes parmi les résultats issus de la normalisation de la teneur brute estimée par le reste de la perte au feu. Pour les deux échantillons les plus riches en matières organiques, la teneur estimée en Al_2O_3 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CR}^*$) est aberrante. L'investigation détaillée des données montre que les blocs dans lesquels seulement la perte au feu de l'échantillon central est mesurée présentent un écart important entre la teneur en Al_2O_3 calculée par ces deux méthodes et sont des sources des valeurs estimées aberrantes. Spécialement pour les blocs dont les échantillons centraux sont très riches en PF et pour lesquels la teneur en alumine n'est pas disponible, on s'attend à des valeurs aberrantes, car la teneur en PF sera très proche de la valeur de l'échantillon central. Par contre, la valeur de l' Al_2O_3 brute sera estimée en utilisant des données voisines (en général plus élevées que la propre teneur de l'échantillon central). Ainsi, la valeur normalisée de la teneur d' Al_2O_3 brute sur le reste de la perte au feu sera surestimée.

La figure suivante montre le diagramme de corrélation entre la teneur estimée directement en utilisant la teneur mesurée et la teneur normalisée en utilisant le contenu d'alumine brute et le reste de la perte au feu seulement pour les blocs ayant l'échantillon central analysé. L'amélioration de la corrélation entre les deux variables et la réduction de l'écart entre elles sont très significatives. Dans ce cas également, l'écart important entre les résultats de deux méthodes provient de la perte au feu très élevée.

Il est donc convenable de limiter l'estimation aux seuls blocs dont l'échantillon central est analysé. Dans ce cas, pour les blocs dont la teneur de PF est inférieure à 24%, le coefficient de corrélation est égal à 1 (et 0.99 pour tous les blocs). La pente de régression 0.97 n'est pas très loin de 1 (0.98 pour tous les blocs). Mais l'ordonnée à l'origine est 1.47 (et 0.91 pour tous les blocs).

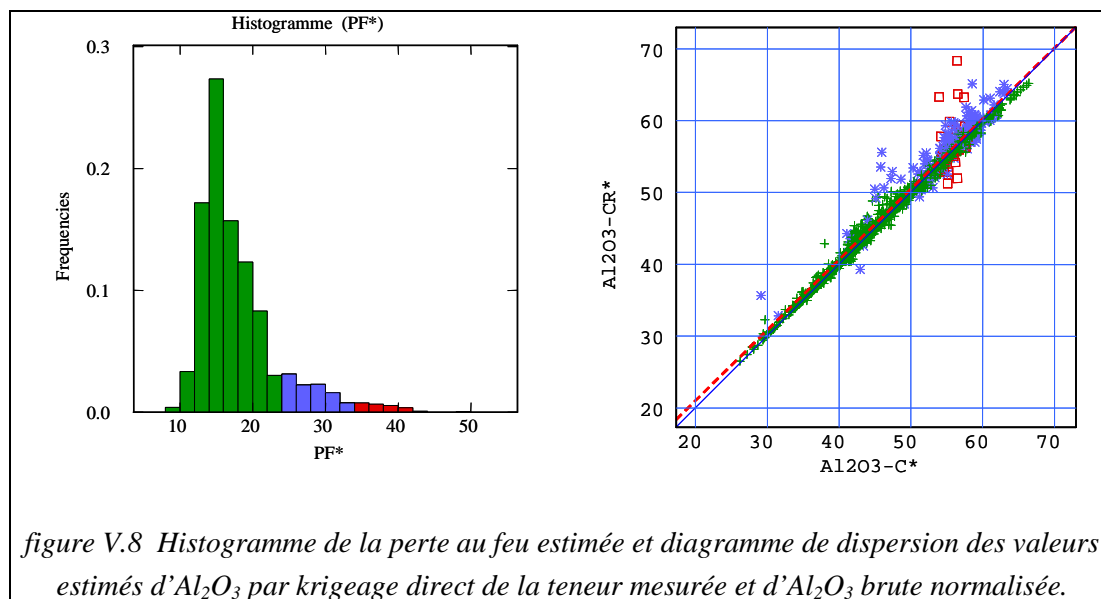


figure V.8 Histogramme de la perte au feu estimée et diagramme de dispersion des valeurs estimées d' Al_2O_3 par krigeage direct de la teneur mesurée et d' Al_2O_3 brute normalisée.

La non linéarité de la teneur mesurée sur l'échantillon calciné doit être prise en considération lors du processus du mélange surtout quand la différence entre les éléments est importante, Le tableau suivant montre un exemple de la recette d'exploitation pour le produit 47N, servant à la fabrication de chamotte

Tableau V.1. Recette d'exploitation pour alimenter la production de chamotte 47N.

Teneur mesurée			Qualité		47N			Destination		Oriolles	
Provenance	Camion	T	PF	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Tremie	(%)	Origine
50/55TD PFGPAS	Un 8*4	216	19.80	58.82	1.16	0.59	0.12	0.05	2	16.67	GPAS
42/44TG PFGPAS	Deux 6*4	360	14.70	44.18	1.15	0.80	0.10	0.40	2	27.78	GPAS
42/44TI PF MAUDET	Deux 6*4	504	14.20	44.12	1.41	0.95	0.08	0.39	1	38.89	MAUDET
50/55TB PFGPAS	Un 8*4	216	25.50	52.65	1.06	1.14	0.12	0.28	1	16.67	GPAS
Comparaison											
Calcule simple		1296	17.16	48.01	1.24	0.88	0.10	0.32			
Teneur réelle			17.16	47.79	1.24	0.88	0.10	0.32			

En résumé sous certaines conditions mentionnées en annexe A, le krigeage direct de la teneur donne des valeurs assez proches de la teneur réelle du bloc. Comme indiqué précédemment, la différence faible entre les valeurs participant au processus d'estimation (estimation de PF, estimation d' Al_2O_3-C et estimation d' Al_2O_3-B) est un facteur important pour assurer une faible différence entre les résultats. La présence importante et locale de matière organique augmente l'écart entre le résultat de l'estimation par les deux méthodes mentionnées sur les blocs proches.

V.2.2. Des tailles des échantillons et de la régularisation du support d'estimation

Grâce aux progrès des méthodes d'analyse, les coûts d'analyse ne cessent de baisser. Cela nous a permis d'avoir plus d'échantillons et donc plus d'information. Le niveau de détail (qu'on souhaite d'avoir) dans l'estimation dépend de la longueur des échantillons et de la maille d'échantillonnage. On sait bien que la sélectivité augmente quand l'unité de sélection est plus petite et qu'on a des informations plus détaillées. Pour cela normalement la longueur des échantillons dans les carottes est égale ou inférieure à la hauteur de la plus petite unité exploitable (cette unité est connue dans la littérature anglaise sous le nom de SMU ; Selective Mining Unit).

On ne peut pas traiter de même façon des échantillons ayant des tailles différentes. Ils contiennent des niveaux de précision différents. La méthode de calcul de la régularisation des échantillons n'a rien de sophistiqué. On ne calcule qu'une moyenne pondérée (la teneur de l'échantillon pondérée par la longueur de l'échantillon). Néanmoins, un échantillon très long ne doit pas être coupé en plusieurs échantillons de petite taille. Cela arrive fréquemment si on n'a qu'une analyse pour un long intervalle stérile entre des couches minéralisées ou en bordure du gisement. (David, 1988).

La plupart des praticiens de la géostatistique dans les industries minières métalliques ou dans le cas du charbon prennent une dimension uniforme de l'échantillon, telle qu'une longueur fixe d'échantillon carotte. De même, la plupart des manuels de géostatistique, des logiciels et des méthodologies sont écrits en intégrant cet aspect de l'analyse géostatistique, parce qu'il s'applique à la plupart des conditions.

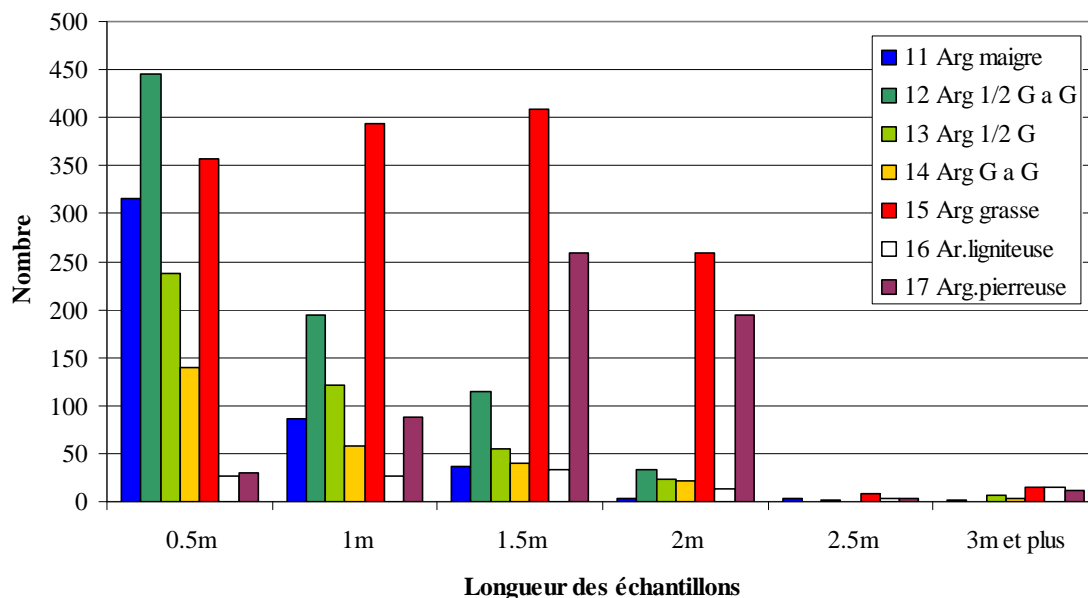
De plus en plus fréquemment, les échantillons sont découpés en carottes, la plupart du temps dans les intervalles s'étendant de 1m à 3m. La longueur de l'échantillon sur laquelle des variogrammes sont calculés dépend du niveau du détail qu'on souhaite avoir dans l'évaluation du gisement. Si la plus petite unité de sélectivité de la mine est par exemple 10m*10m*1m, alors les composites de 1m sont suffisants. La méthode pour calculer la teneur des composites est simple. Il s'agit en fait d'une moyenne pondérée (pondérée par la longueur et la densité s'il y a lieu).

Cependant, un échantillon très long ne devrait pas être coupé en plusieurs intervalles courts d'une teneur égale. Les longs intervalles stériles se produisent parfois dans un dépôt et sont normalement représentés par une seule analyse. On ne devrait pas inclure 3 échantillons de 1m de teneur égale dans la base de données de variogramme à la place d'un échantillon ayant une longueur de 3m, mais ils devraient être inclus dans la base de données de krigeage. On doit faire attention lors de l'utilisation de programmes qui calculent la teneur de composites (David 1988).

Comme on a vu précédemment, la taille des échantillons kaoliniques (codes 11 à 17) varie de 0.5m à plus de 3m (depuis récemment on essaie de la limiter à 2m). La figure suivante montre le nombre des échantillons par classe de longueur des échantillons kaoliniques, de code 11 à 17. La figure V.9.b présente l'histogramme du nombre des échantillons pour tous les codes lithologiques 11 à 17 en excluant l'argile ligniteuse (de code 16) qui ne sera pas exploitée. Presque 40% des échantillons sont une longueur d'environ 0.5m, et 23% de 1m ou de 1.5m. Environ 98% des échantillons ont une longueur inférieure à 2.5m.

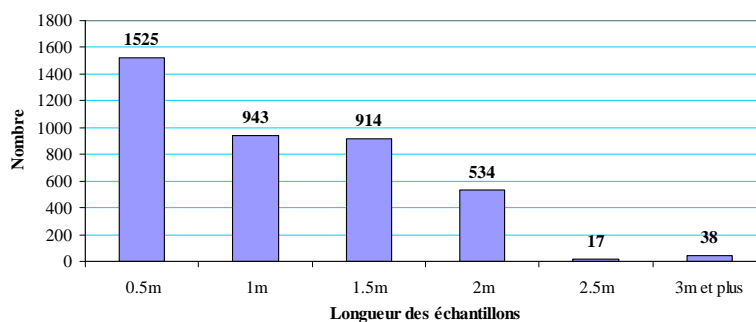
D'autres phénomènes intéressants peuvent être découverts en comparant la longueur des échantillons pour les lithologies plus sableuses (code 11 et 12) avec la lithologie de l'argile pierreuse (riche en Al_2O_3 et exempte de quartz). Les échantillons d'argiles maigres plus longs que 1.5m sont très rares, mais par contre les échantillons d'argiles pierreuses ont des longueurs de 1m, 1.5 ou 2m. Cela montre que la lithologie nommée « argile pierreuse » est plus continue verticalement. Comme on l'a vu, dans le chapitre précédant, cette continuité lithologique n'a pas de signification du point de vue de la teneur. La variation de la teneur (en Al_2O_3) est plus importante dans les argiles pierreuses que dans les argiles maigres : on a constaté un changement de 5% de teneur entre les segments d'un échantillon d'une longueur de 2m d'une argile pierreuse. Il n'est pas rare, non plus, de trouver deux échantillons provenant de deux codes différents avec des teneurs très proches.

Un des buts de l'estimation est la prévision de l'histogramme de la distribution de la teneur dans un gisement. La figure V.10.a montre l'histogramme des données. Sur l'histogramme des données, considérées ponctuelles, la fréquence des classes moins riches est surestimée par rapport à l'histogramme des données pondérées par la longueur des échantillons, ce qui confirme le rôle de la longueur différente des échantillons selon leur lithologie, comme mentionné à la figure précédente.



a.

figure V.9 Histogramme de la taille des échantillons, par classe lithologique (a), et pour toutes les argiles kaoliniques (b).



b.

La courbe de la distribution de la teneur, pour les données issues du découpage des échantillons sur un support d'une longueur de 0.5m coïncide avec la courbe des échantillons (pondérés par leur longueur), cela provient du fait que les longueurs sont choisies comme multiple de 0.5m (0.5m, 1m, 1.5m et etc.). En augmentant la taille du support, l'écart type baisse et la courbe de la distribution se concentre plus autour de la moyenne. On constate une perte d'information liée aux niveaux plus fins que la taille du support. Le Tableau V.2 permet une observation de ces différents phénomènes.

Tableau V.2. Statistique sur la taille et la longueur des différents supports

Longueur du support	0.5 m	1 m	1.5 m	2 m
Echantillons complets	3701	1603	910	591
Nombre total	6029	3226	2301	1823
Somme de longueur des échantillons complets (m)	1850.5	1603	1365	1182

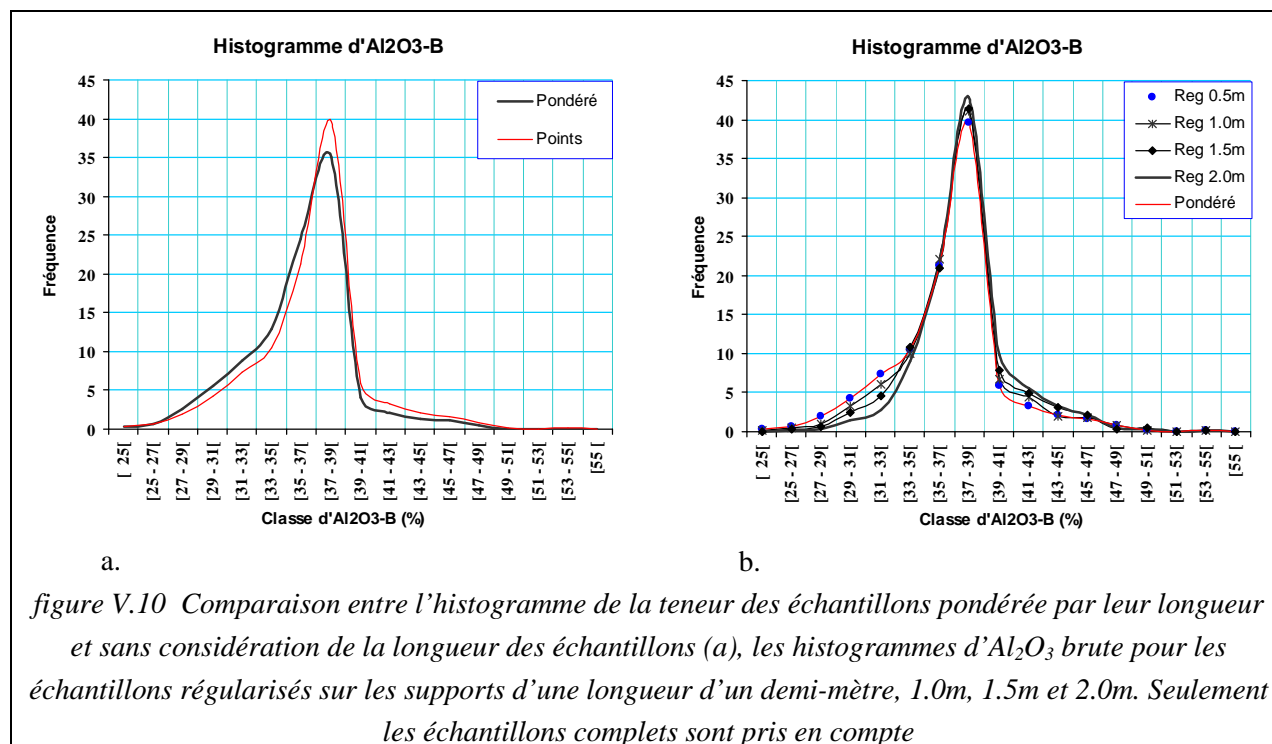


figure V.10 Comparaison entre l'histogramme de la teneur des échantillons pondérée par leur longueur et sans considération de la longueur des échantillons (a), les histogrammes d'Al₂O₃ brute pour les échantillons régularisés sur les supports d'une longueur d'un demi-mètre, 1.0m, 1.5m et 2.0m. Seulement les échantillons complets sont pris en compte

Le Tableau V.3 montre les paramètres statistiques pour ces supports différents, la baisse de la variance n'est pas très forte, l'origine de ce phénomène se trouve dans la méthode d'échantillonnage qui favorise les variations importantes aux petites distances. En découpant les échantillons pour une taille de support plus petite (0.5m) on augmente l'effectif des données de 1865 à 3701. Malgré cela, on constate une augmentation de l'écart type qui vient du nombre plus important des données riches (remarque : dans ce tableau les données sont supposées être ponctuelles).

En réalité, les échantillons analysés ne peuvent pas être considérés comme des données ponctuelles, car en premier lieu, ils sont de tailles différentes. Le deuxième problème, résultant de cette méthode d'échantillonnage est la surestimation des variations de la teneur aux petites distances mise en évidence par des échantillons successifs (avec les codes lithologiques différents), tandis que pour la même distance on n'a pas de valeur mesurée sur les échantillons longs.

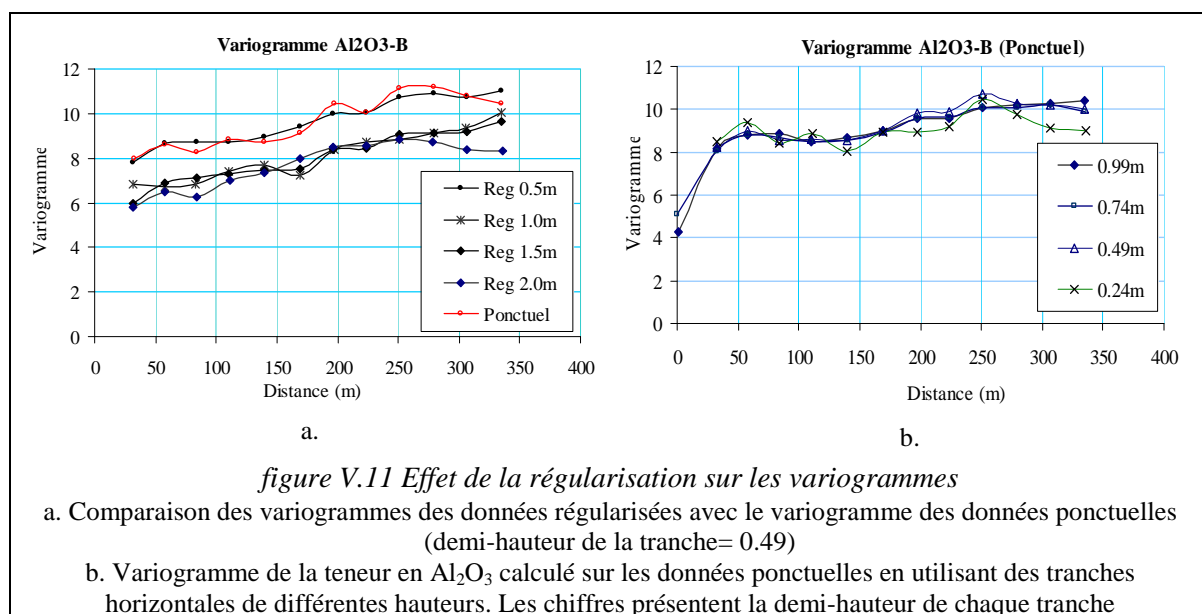
En général, on constate la baisse des valeurs du palier des variogrammes, lorsqu'on augmente la taille des supports. On l'a constaté précédemment sur la variance totale des échantillons, cela est particulièrement visible entre le variogramme sur un support de 0.5m et les autres variogrammes. Ce variogramme sur support à 0.5 m montre une forme plus lisse que le variogramme des données ponctuelles.

Vu le remplacement de la valeur de l'échantillon, et son affectation à chaque segment de l'échantillon, on n'attend pas une grande différence entre les deux variogrammes tant que la longueur limitée des échantillons permet d'avoir des paires aux écarts identiques.

Tableau V.3 Statistique des variables sur différents supports

Support	Variable	Eff.	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart Type	Variance	C.Variation
Ponctuel	100-PF	1865	56.17	92.25	86.42	2.68	7.17	0.03
	Al ₂ O ₃ -B	1865	22.32	54.02	35.99	3.53	12.47	0.1
	Fe ₂ O ₃ -B	1865	0.25	11.63	1.23	0.76	0.57	0.61
	K ₂ O-B	1865	0.01	2.19	0.63	0.42	0.18	0.67
0.5m	100-PF	3701	56.17	92.25	86.02	2.87	8.21	0.03
	Al ₂ O ₃ -B	3701	22.32	54.02	36.67	3.66	13.37	0.1
	Fe ₂ O ₃ -B	3701	0.25	11.63	1.16	0.7	0.49	0.6
	K ₂ O-B	3701	0.01	2.19	0.55	0.43	0.19	0.78
1.0m	100-PF	1603	56.17	90.9	85.82	2.85	8.12	0.03
	Al ₂ O ₃ -B	1603	22.63	54.02	37.04	3.46	11.96	0.09
	Fe ₂ O ₃ -B	1603	0.3	7.76	1.13	0.65	0.43	0.58
	K ₂ O-B	1603	0.01	2.19	0.52	0.41	0.17	0.79
1.5m	100-PF	910	62.68	90.77	85.61	2.83	8.03	0.03
	Al ₂ O ₃ -B	910	25.78	54.02	37.37	3.29	10.83	0.09
	Fe ₂ O ₃ -B	910	0.35	4.71	1.07	0.52	0.27	0.49
	K ₂ O-B	910	0.01	1.78	0.49	0.39	0.15	0.79
2.0m	100-PF	591	59.11	89.85	85.41	2.79	7.78	0.03
	Al ₂ O ₃ -B	591	26.08	54.02	37.75	3.12	9.75	0.08
	Fe ₂ O ₃ -B	591	0.34	4.43	1.02	0.45	0.21	0.44
	K ₂ O-B	591	0.01	1.75	0.46	0.36	0.13	0.8

Les valeurs sont répétées donc les écarts aussi, mais dans ce cas, les écarts sont répétés en proportion avec la longueur des échantillons. Pour les échantillons très longs, on produit des segments qui dépassent la hauteur de tranche du calcul de variogramme. Il en résulte un écart entre ces deux variogrammes. La figure V.11.b montre l'effet du choix de la demi-hauteur de la tranche du calcul sur la forme du variogramme horizontal pour les données ponctuelles. Les paires à très faible distance sont les données du voisinage vertical.



La figure V.12.a en particulier, rend bien compte de la baisse des valeurs du palier du variogramme sur les supports les plus longs. La divergence la plus importante entre les variogrammes, à grande

distance, peut être expliquée par le non prise en compte, dans le calcul, des niveaux très fins d'argile (d'épaisseur inférieure à la longueur du support). Les séquences les plus superficielles du kaolin dans le gisement BDR (partie nord-est) sont des kaolins à teneur faible ou moyenne, espacés d'au moins 4 ou 5 mètres de la séquence la plus massive et continue du gisement qui commence parfois par une argile hyper alumineuse.

En gros, la forme du variogramme peut être supposée très similaire pour les variogrammes verticaux et surtout pour les variogrammes horizontaux. Malgré la forme parallèle de la structure plus étendue des variogrammes horizontaux, on constate une différence entre les paliers de la structure spatiale aux faibles distances ($h < 40\text{m}$). Grâce au variogrammes verticaux, on peut constater que la structure spatiale révèle un effet de pépité très faible. Cette structure horizontale à faible distance peut ainsi être modélisée par un modèle dérivable à l'origine.

Si on compare le variogramme des données ponctuelles avec celui des données régularisées (sur un support de 0.5m par exemple ; figure V.12.b), on constate que la valeur du variogramme pour le premier pas est au dessus de la courbe du variogramme de support régularisé. Cela n'est pas étonnant, car les faibles variations aux petites distances ne sont pas représentées, dans le cas du support régularisé.

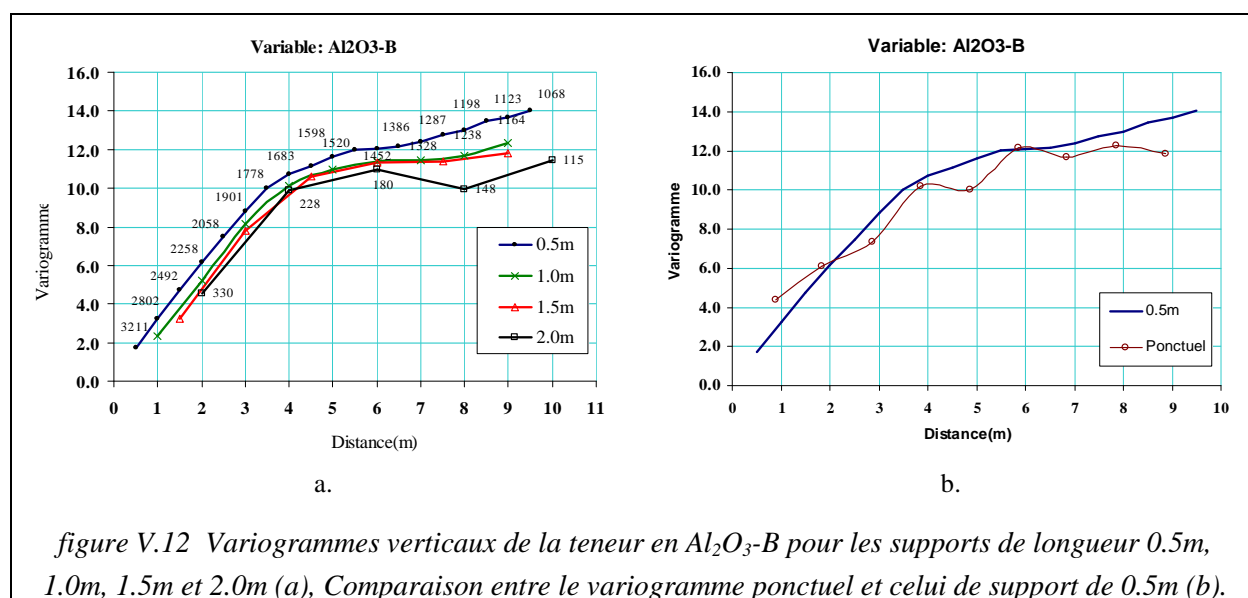


figure V.12 Variogrammes verticaux de la teneur en $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ pour les supports de longueur 0.5m, 1.0m, 1.5m et 2.0m (a), Comparaison entre le variogramme ponctuel et celui de support de 0.5m (b).

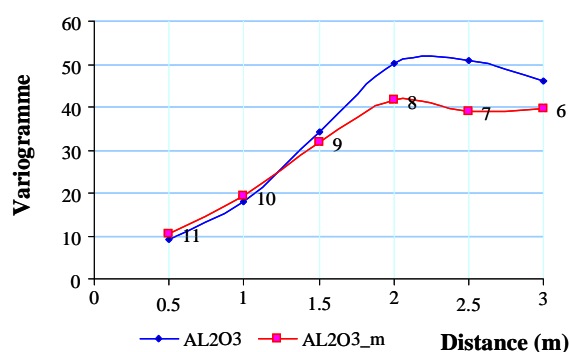
La figure V.13 présente le résultat de la variographie le long du sondage S05.0910 sur lequel on a l'analyse chimique de chaque tronçon de 50cm de carotte. On le compare avec la teneur de l'échantillon en suivant le processus habituel (analyses à différentes longueurs, et affectation de la valeur d'analyse de l'échantillon à chaque sous domaine de l'échantillon). Le premier phénomène constaté est la différence des paliers des variogrammes : ce qui est attendu est une variance plus faible pour la variable moyennée. Dans le calcul de la variance et du variogramme sur support régularisé de grande longueur, la variation, due à la nature, entre les segments de petite taille, est négligée.

Pour les premiers pas de variogramme, la valeur du variogramme de la variable moyennée peut être relativement plus faible, car on impose un écart égal à 0 entre les segments d'un échantillon. D'autre part, on augmente l'écart de la teneur aux limites des échantillons en remplaçant une fonction continue par une fonction non-continue (voir figure IV.11).

La conséquence d'une portion plus importante du variogramme (de la variation totale) affectée aux premiers pas de calcul, est, qu'en général, le poids de krigeage des points voisins sera surestimé. A cause de la continuité artificiellement imposée au système, les points voisins les plus proches deviennent relativement plus importants et plus déterminants dans l'estimation.

figure V.13 Comparaison du variogramme d' Al_2O_3 mesuré et moyenné (Al_2O_3 -m).

Les chiffres sur les graphes présentent le nombre de paires utilisé dans le calcul. Al_2O_3 est la variable des valeurs réellement analysées sur le support de 50cm.



La teneur est considérée comme une variable aléatoire régionalisée. La teneur exprimée pour un échantillon n'est que la moyenne de cette variable sur l'ensemble de sa longueur. La teneur de chaque partie (chaque point) de l'échantillon peut varier autour de cette valeur moyenne. Par conséquent, il est important de trouver une correspondance entre la taille des échantillons et la hauteur de la cible d'estimation. Une variation de 5% de la teneur à l'intérieur de l'échantillon, impose une différence de 2.5% entre la vraie valeur et la valeur assigné (par découpage). Cela veut dire qu'on aura 2.5% de biais d'estimation en utilisant la valeur marquée sur la liste du sondage. En utilisant un système de krigeage qui donne 50% de poids au point central, le biais peut être réduit à 1.25%. Cela n'aura pas une conséquence importante sur le résultat de l'estimation globale (les surestimés et les sous estimés se compensent), mais cela conduira à des erreurs de classification pour l'estimation locale.

Le calcul d'un composite (support) sur une longueur plus grande que la taille des échantillons ne plait pas aux exploitants, car on perd certaines informations. Comme exposé précédemment, l'inverse de ce processus donne une image erronée de la variabilité à l'intérieur du gisement et l'illusion de prendre des valeurs remplacées (en découpant un échantillon en segments plus petits) comme les vraies valeurs des segments. Ce dernier processus induit directement un biais dans l'estimation.

En résumé, il est très important de réfléchir sur la taille des échantillons (longueur) et sa relation avec SMU. La géostatistique impose de travailler sur les données provenant d'une taille fixe (égale). Dans le cas actuel (échantillons de longueurs différents), le calcul de la teneur par la régularisation devient indispensable. On insiste sur l'importance d'une étude détaillée sur la taille appropriée pour la régularisation. Dans le cas de gisement BDR la forme du variogramme n'est pas très sensible à la taille choisie pour la régularisation. Mais cela n'empêche d'avoir une erreur importante d'estimation (l'écart entre la teneur réelle et la teneur estimée) dans le cas où la variation de la teneur à l'intérieur des échantillons (surtout des échantillons très longs) devient importante et suit d'une tendance.

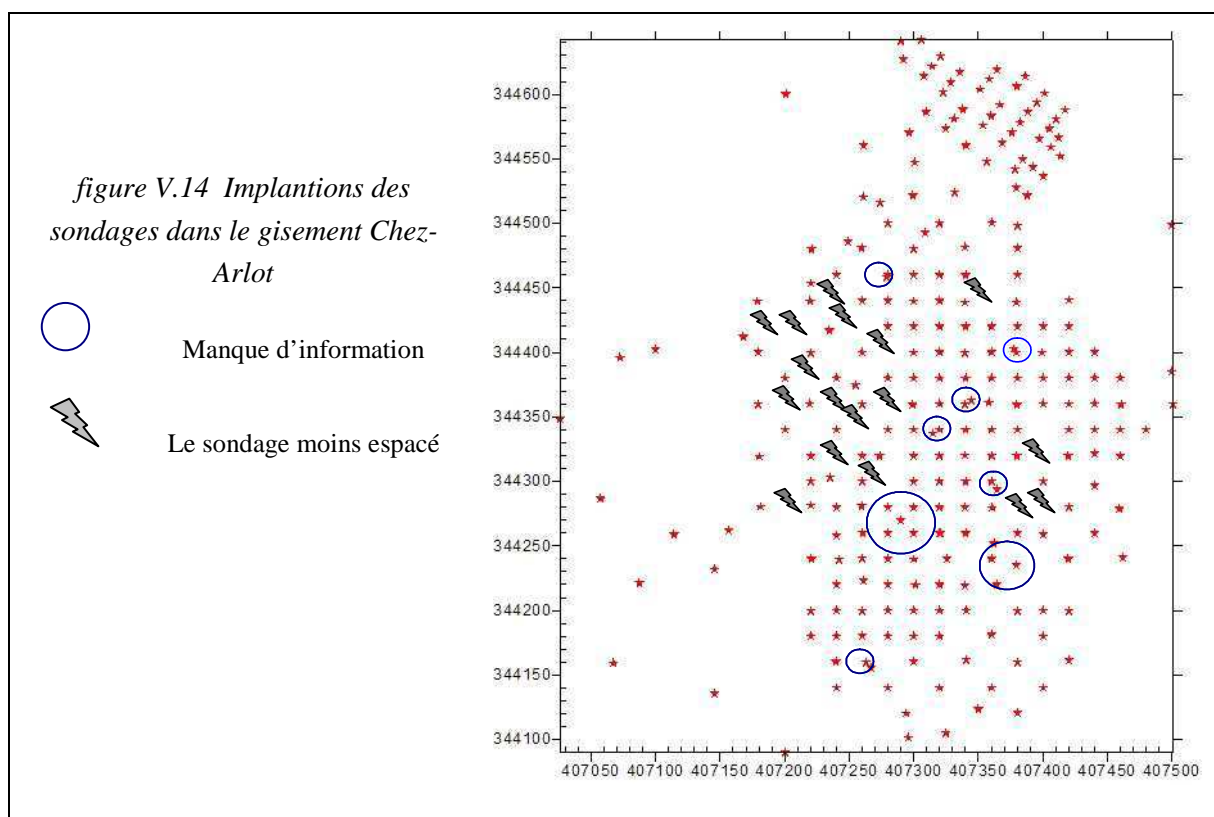
V.2.3. Données manquantes

Le problème du manque d'information provient des données anciennes. Dans ces échantillons l'analyse chimique n'était pas fait pour tous les oxydes (surtout SiO_2 , CaO , MgO et Na_2O). Le manque de la teneur de K_2O est le moins fréquent, manquent ensuite la teneur en TiO_2 et Fe_2O_3 . Ce problème est de moins en moins fréquent, l'analyse chimique des échantillons tendant à devenir de plus en plus complète.

Un échantillon d'argile kaolinique ne sera pas analysé s'il est très maigre (riche en grès) examiné par le tamisage à 40 mesh, ou très coloré (riche en oxydes de fer ou en matière organique). Les argiles définies comme argiles maigres sont rarement analysées. Dans chaque gisement très peu d'échantillons de ce code seront analysés afin d'avoir une approximation de leur teneur (Tableau V.4). Cette approximation sera utilisée pour le paramétrage du logiciel (voir Tableau V.19).

Tableau V.4 Effectif des échantillons non analysés par gisement

Code : Faciès	Chez Arlot		Chez Maudet		Bois des Rentes	
	Analysé	Non Analysé	Analysé	Non Analysé	Analysé	Non Analysé
10 : Argile très maigre	6	47	23	123	9	742
11 : Argile maigre	103	27	193	141	47	407
12 : Argile 1/2 G a G	191	1	240	11	775	13
13 : Argile 1/2 G	74	6	183	27	418	27
14 : Argile grasse à grain	70	5	129	21	248	13
15 : Argile grasse	122	1	288	32	1353	89
16 : Argile ligniteuse	0	9	0	8	118	1
17 : Argile Pierreuse	7	0	74	6	577	10
84 : Sable peu Argileux	85	1217	0	224	2	2580
85 : Sable argileux	27	407	0	325	2223	4



Le problème du manque d'information peut être étudié du point de vue spatial. La figure V.14 montre l'implantation des sondages dans le gisement Chez Arlot. L'emplacement des sondages, dans les premières étapes de reconnaissance, est choisi sur une maille régulière. Au fur et à mesure des acquisitions d'information, on évite de faire des sondages dans les zones moins riches ou moins complexes. En revanche, de façon habituelle, les zones riches (qui présentent souvent une variation plus importante) aux bordures du gisement seront sondées plus fréquemment. Cette irrégularité de la répartition des sources d'information peut mettre en cause la représentativité de ces échantillons. Le krigeage sait intégrer l'effet des données redondantes et les données proches sur le calcul des poids, mais

ce qui important est le variogramme de base utilisé pour le krigeage. N'oublions pas que le variogramme est calculé avec les données de sondage.

Le manque d'information pour les échantillons qui ne sont pas pris dans l'enveloppe d'estimation ne pose pas beaucoup de problème.

Il arrive souvent que certains nœuds de la maille n'aient pas été forés pour diverses raisons. Avant de les considérer comme des données absentes, il est important de vérifier que ces données ne sont pas en fait des données nulles ou de stérile (Journel et Huijbregts 1978). La lacune d'information pose certains problèmes d'automatisation de l'estimation. On propose donc d'étudier une estimation préalable de l'indicateur du kaolin ou de l'estimation de l'épaisseur d'argile. Le résultat de telles estimations permettra de filtrer les blocs de stérile, en estimant seulement les blocs ayant une épaisseur d'argile estimée, ou une indicatrice estimée, supérieure à un seuil défini.

V.2.4. Géométrie du gisement

Comme on a vu précédemment, les couches du kaolin ne sont pas parfaitement horizontales. D'une part les forces tectoniques, d'autre part la compaction différente au centre du dépôt en comparaison de celle de la bordure, et l'éventuel soutirage karstique ont abouti à une forme plus ou moins compliquée et variable des dépôts actuels de kaolin.

On a déjà évoqué ce problème dans le chapitre IV.2.4. Ce sujet a été étudié dans le cas des gisements sous forme de couches plissées (David 1988, Dowd et Milton 1987, Dagbert et al. 1984, Chilès et Delfiner 1999), ou des gisements coupés par les failles (McArthur 1988), ou enfin les réserves carbonatées de pétrole (Sahin et al. 1998).

David (1988) propose différentes méthodes pour une transformation des coordonnées cartésiennes en ce qu'il appelle les coordonnées naturelles. Il propose le marquage des couches et l'utilisation de la projection sur la ligne de plus grande pente des couches. Le processus est schématiquement illustré par la figure V.15. Il va de soi que pour appliquer cette technique, l'interprétation géologique des limites des couches est primordiale. Dans un espace 3D, le calcul des coordonnées naturelles se révèle très compliqué.

Pour les couches sédimentaires de faible pente, une surface de référence peut être utilisée pour l'horizontalisation des couches. Dans cette méthode, la cote (Z_p) de chaque point P de l'espace sera corrigée par la cote du point ayant la même latitude et longitude (Z_s). La nouvelle cote (Z_{np}) sera calculée par $Z_{np} = Z_p - Z_s$.

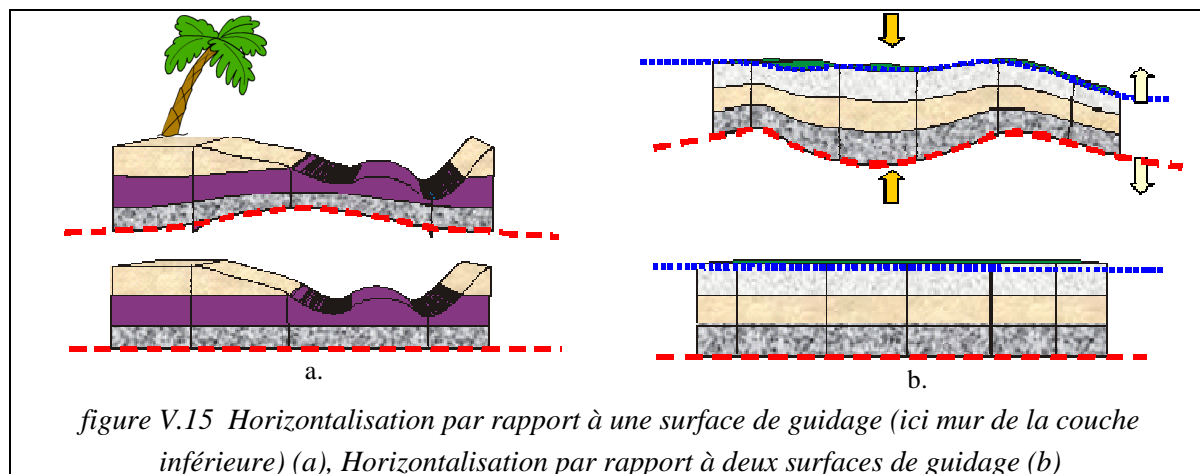
Dans certains logiciels, il est possible d'aplatir le gisement entre deux surfaces définies, cette méthode est la plus fréquemment utilisée pour l'interpolation géologique et la simulation des variables catégorielles. L'application de cette technique pour les variables continues comme la teneur, pose le problème de non-uniformité de la taille des échantillons (support d'estimation), car il sera nécessaire de resserrer des parties plus épaisses du gisement et d'étirer les parties moins épaisses. La figure suivante montre schématiquement l'horizontalisation en utilisant une surface de référence, et la discrétisation entre deux surfaces limitantes du gisement.

On peut résumer la discrétisation de l'espace d'estimation par les étapes suivantes :

- Pour chaque cellule de la grille d'estimation ou chaque sondage, on prend la cote (z) de la surface supérieure et de la surface inférieure (Z_{1top} et Z_{1base}) ;
- On choisit la taille de la nouvelle géométrie (Z_{2top} et Z_{2base}) ;

Chaque point peut être projeté avec le même X et Y mais avec un nouveau (z) qui est

- $Z_{2p} = (((Z_{1p} - Z_{1base}) / (Z_{1top} - Z_{1base})) * (Z_{2top} - Z_{2base})) + Z_{2base}$



V.2.4.1. Horizontalisation par rapport au toit de la séquence

Le changement rapide de régime de sédimentation est marqué par le dépôt du sable grossier (code 82, coloré en rose dans la figure V.16) au dessus des séquences argileuses (coloré en jaune). La figure V.16 montre une partie d'une coupe du gisement BDR (Y=336200), on distingue bien la séquence fluviale sableuse déposée sur les argiles ou les sables plus ou moins argileux (colorés en vert). Le mur de cette séquence sableuse a été utilisé comme le marqueur du toit de l'argile. La cote du marqueur est enregistrée en traçant le profil sur chaque coupe du gisement (BDR-NE). La surface de contact est interpolée sur une grille régulière. L'interpolation de données permet d'avoir une cote (Z_r) pour chaque sondage. La valeur de Z_h (nouvelle coordonnée) est calculée en utilisant le positionnement de l'échantillon (Z) et la cote Z_r sur le sondage ; $Z_h = Z - Z_r$

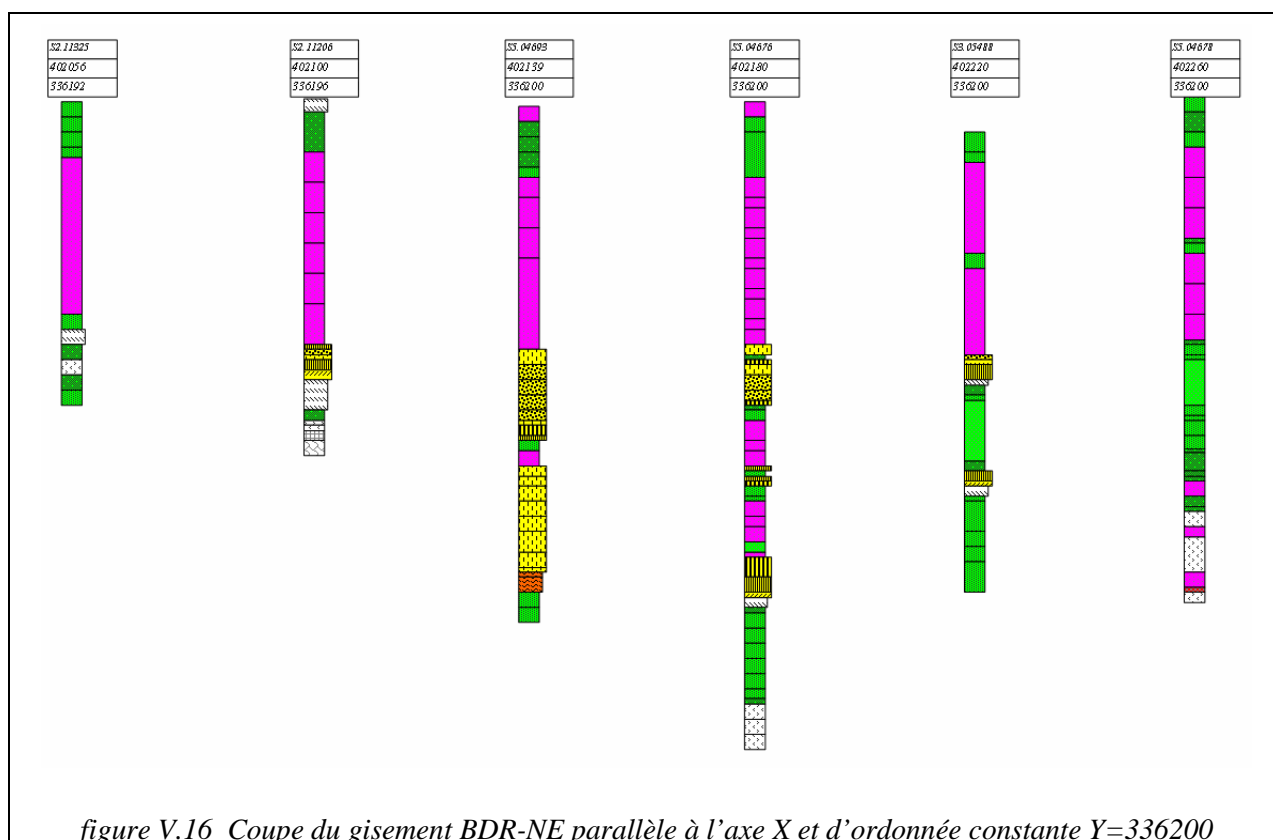


figure V.16 Coupe du gisement BDR-NE parallèle à l'axe X et d'ordonnée constante Y=336200

Malgré sa simplicité apparente, la tâche de la définition de la surface de référence s'avère complexe, dans la pratique, notamment pour l'interpolation entre les coupes ou entre les différentes séquences du kaolin (par exemple entre le sondage S5.04693 et le sondage S5.04697). Ce changement important de faciès, lié à l'énergie de transport du système fluvial, marque bien la limite entre les deux séquences. Cela a été utilisé également pour définir les séquences sédimentaires à l'échelle du bassin par Dubreuilh (1987).

L'érosion locale de l'argile par le sable ajoute certains problèmes d'interprétation de cette surface comme la surface de guidage de corrélation des argiles.

Les figures suivantes nous permettent de comparer le variogramme des différentes variables calculé dans le système cartésien avec les variogrammes calculés dans le nouveau système qui utilise la surface de contact comme la référence de coordonnée Z.

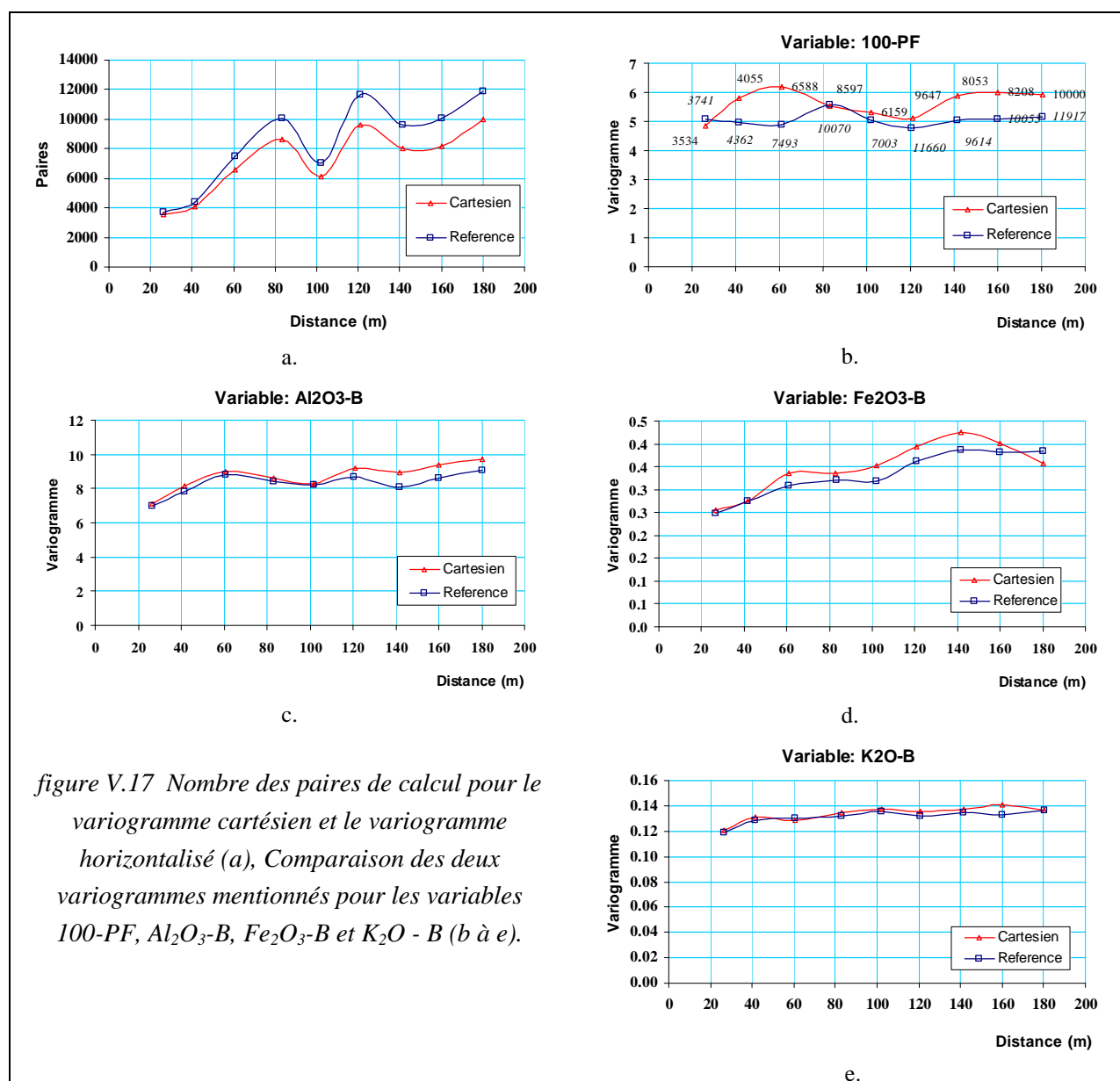


figure V.17 Nombre des paires de calcul pour le variogramme cartésien et le variogramme horizontalisé (a), Comparaison des deux variogrammes mentionnés pour les variables 100-PF, Al₂O₃-B, Fe₂O₃-B et K₂O - B (b à e).

En premier lieu, on constate l'augmentation des nombres des paires de données utilisées pour le calcul du variogramme. L'horizontalisation des données a permis de mettre en relation des données qui n'étaient pas dans la même tranche horizontale. Les variogrammes sont calculés sur la donnée régularisée

à 0.5m (découpe à 0.5m). La hauteur de la tranche est choisie d'épaisseur la plus faible possible pour qu'on ait pour chaque sondage seulement une donnée par tranche (à mi-hauteur, $H=0.24m$).

Les variogrammes de la perte au feu montrent une différence importante entre les deux cas. Pour les autres variables la forme des variogrammes reste similaire. Dans tous les cas, l'horizontalisation augmente la corrélation entre les données. Autrement dit, les données semblent plus corrélées spatialement dans le nouvel espace mis à l'horizontale. L'amélioration de la corrélation spatiale n'est pas très importante et voire négligeable pour Al_2O_3 et pour K_2O-B . Cette similarité entraîne des poids de krigeage identiques pour la même géométrie des données-cibles.

La déformation importante de la géométrie des jeux de données d'estimation jouera donc sur les poids du krigeage, les données voisines participant à l'estimation. Le variogramme vertical reste identique à celui de modèle cartésien.

Dans la partie suivante, on abordera les problèmes liés à la définition de la géométrie de la cible, dans la nouvelle géométrie.

V.2.4.2. Horizontalisation par rapport à l'enveloppe du gisement

Le processus courant de l'estimation chez AGS, consiste à kriger des données « mises à l'horizontale » et discrétisées entre deux surfaces par un modèle de variogramme par défaut. Généralement, les surfaces limitantes du gisement, au toit et au mur, sont utilisées comme enveloppe du gisement (limites) et également comme les surface références de l'horizontalisation. Les échantillons de chaque sondage pris entre ces deux surfaces seront divisés en 20 segments. Le calcul de la teneur des segments consiste à copier la valeur de l'échantillon pour ces sous-segments. On effectue aussi le calcul de la moyenne pondérée pour ces segments qui rendent compte généralement de la présence de deux ou trois échantillons différents. Les valeurs par défaut seront utilisées pour remplacer les lacunes des mesures. La figure V.18 montre le processus de calcul. La variable de lithologie dans le tableau des données régularisées (b) présente le pourcentage de la lithologie kaolinique (code 11 à 17 en excluant le 16, l'argile ligniteuse).

Le premier problème provient de la représentabilité des surfaces limitantes de la totalité du gisement comme surfaces de guidage. Cela est particulièrement discutable pour la surface inférieure qui englobe la séquence inférieure du kaolin (comme on a vu, on peut distinguer jusqu'à 3 séquences kaoliniques). La distance verticale devient très faible sur les sondages ayant seulement un ou deux échantillons de faible épaisseur.

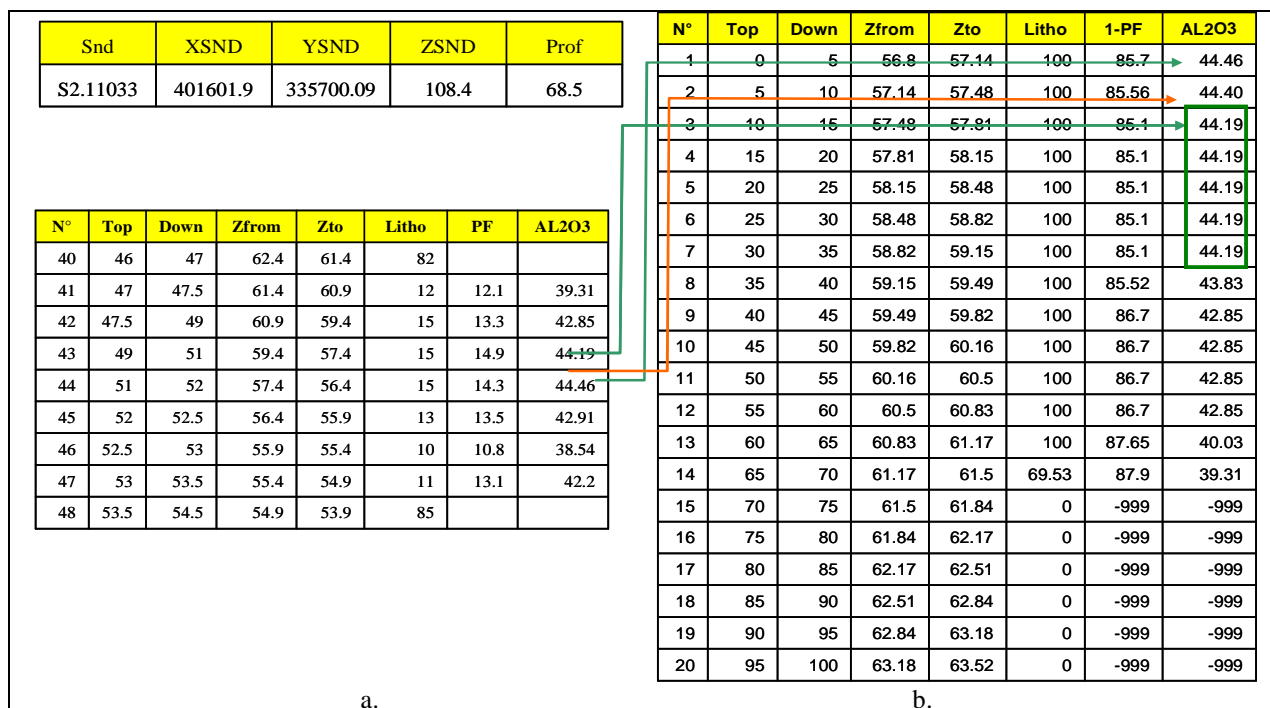


figure V.18 Un exemple de la discrétisation des échantillons entre deux surfaces du guidage du gisement de BDR.

La longueur régularisée des échantillons est 34 cm. Le tableau des données de sondage (a) et le tableau des données régularisées (b).

La figure V.19 montre la mise en relation artificielle des données. La figure V.20.a présente l'histogramme de l'épaisseur du gisement prise entre ces deux surfaces et sa répartition sur le plan du gisement.

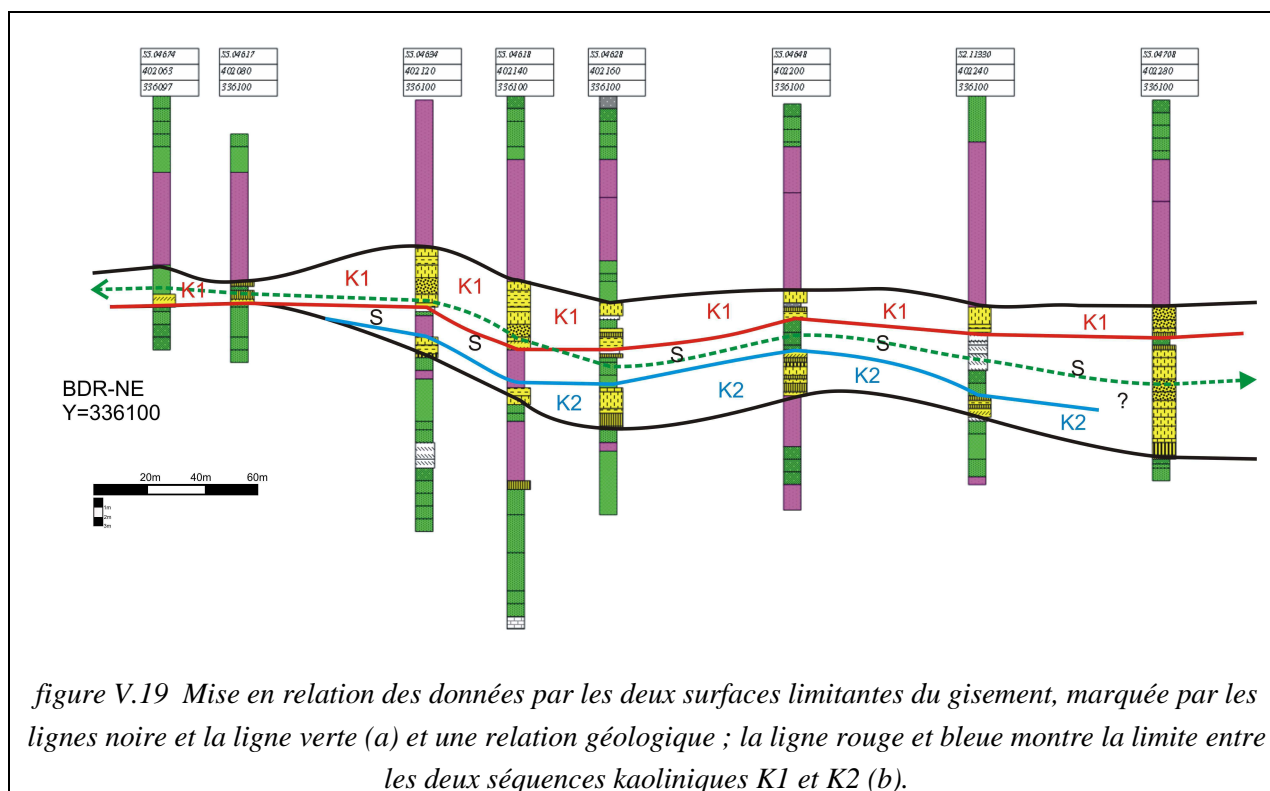
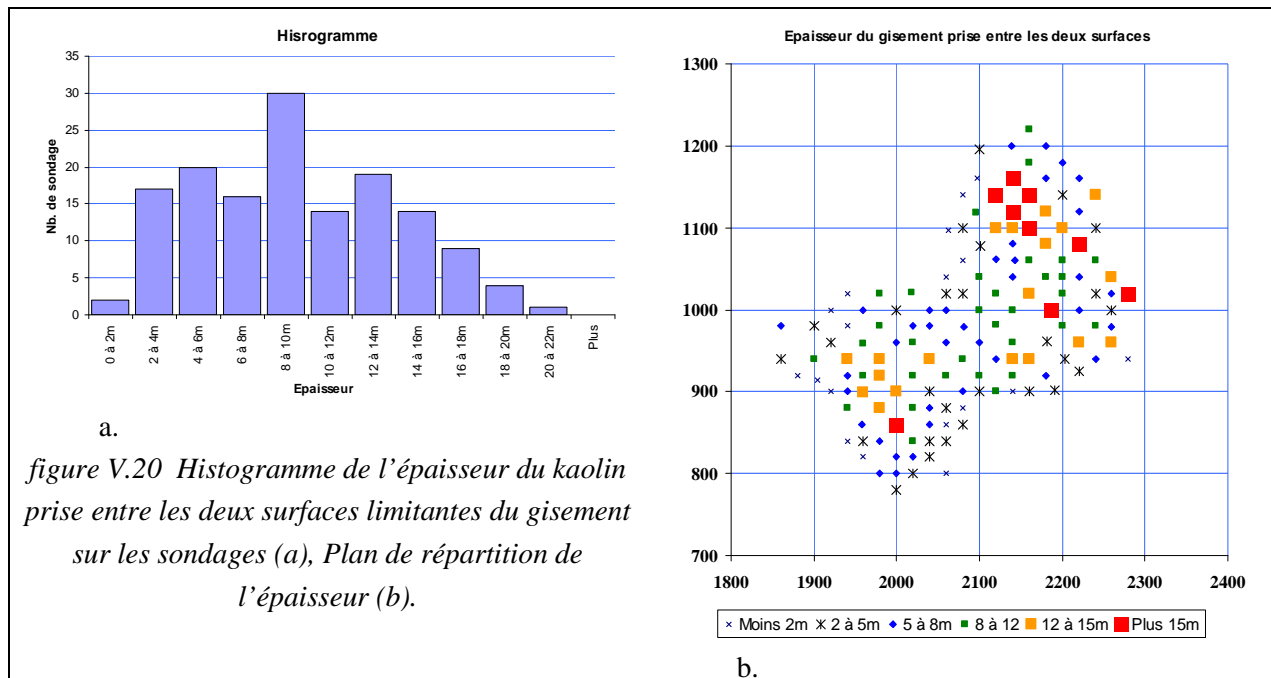


figure V.19 Mise en relation des données par les deux surfaces limitantes du gisement, marquée par les lignes noire et la ligne verte (a) et une relation géologique ; la ligne rouge et bleue montre la limite entre les deux séquences kaoliniques K1 et K2 (b).

Sur les 149 sondages de cette base, dans plus de 40 sondages, l'épaisseur prise entre deux surfaces est inférieure à 5m, et pour un seul sondage est supérieure à 20m. Il est évident que le problème de régularisation ne sera pas négligeable. La relation entre des données de deux sondages ayant une forte différence d'épaisseur prise en compte est complètement artificielle. La moyenne de l'épaisseur prise en compte est égale à 7.6 m.



La longueur des segments varie de 5cm pour une épaisseur de 1m à 1m pour un sondage d'une épaisseur de 20m. Cela montre qu'il existe en réalité un rapport de longueur égal à 20 entre les segments les plus longs et les segments les plus courts. Ceci constitue une variation très forte dont l'explication, par des phénomènes géologiques, n'est pas évidente.

On examine ci-dessous, l'influence des valeurs par défaut affectées aux échantillons pour lesquels l'analyse n'est pas faite. L'effet le plus important vient de valeurs fixées pour les sables argileux et les argiles sableuses. Les écarts importants entre la teneur des argiles kaoliniques (surtout en Al_2O_3) et ces argiles très sableuses qui par ailleurs ne seront pas exploitées, changent la forme du variogramme. En premier lieu, on constate une augmentation de la variance (palier plus important) et en deuxième lieu, une déstructuration du variogramme. L'effet du passage de l'argile sableuse d'un sondage à une argile kaolinique dans un sondage voisin, conduit à une valeur importante du variogramme expérimental pour les premiers pas de calcul.

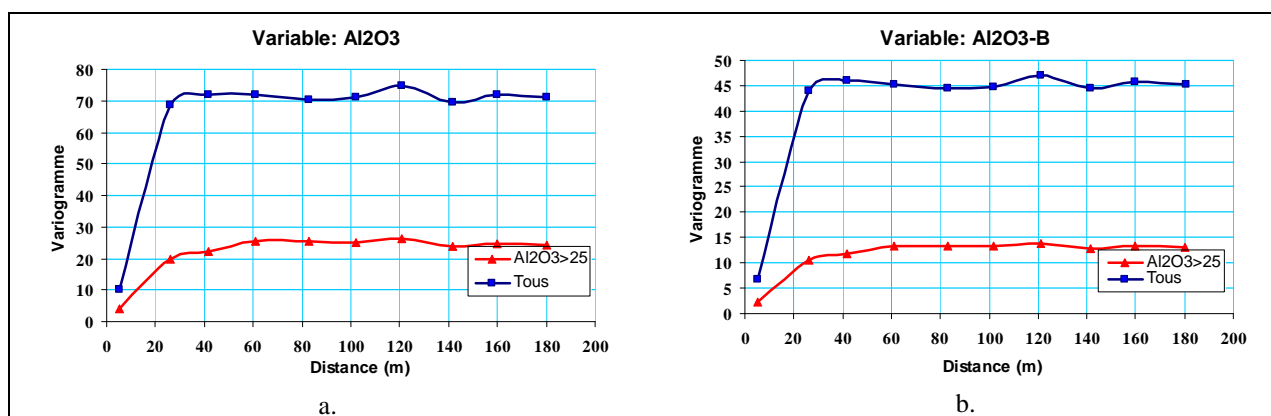


figure V.21 Variogramme d'alumine calcinée (a) et d'alumine brute (b) dans la nouvelle géométrie décompactée et mise à l'horizontale en utilisant deux surfaces qui englobent le gisement de BDR

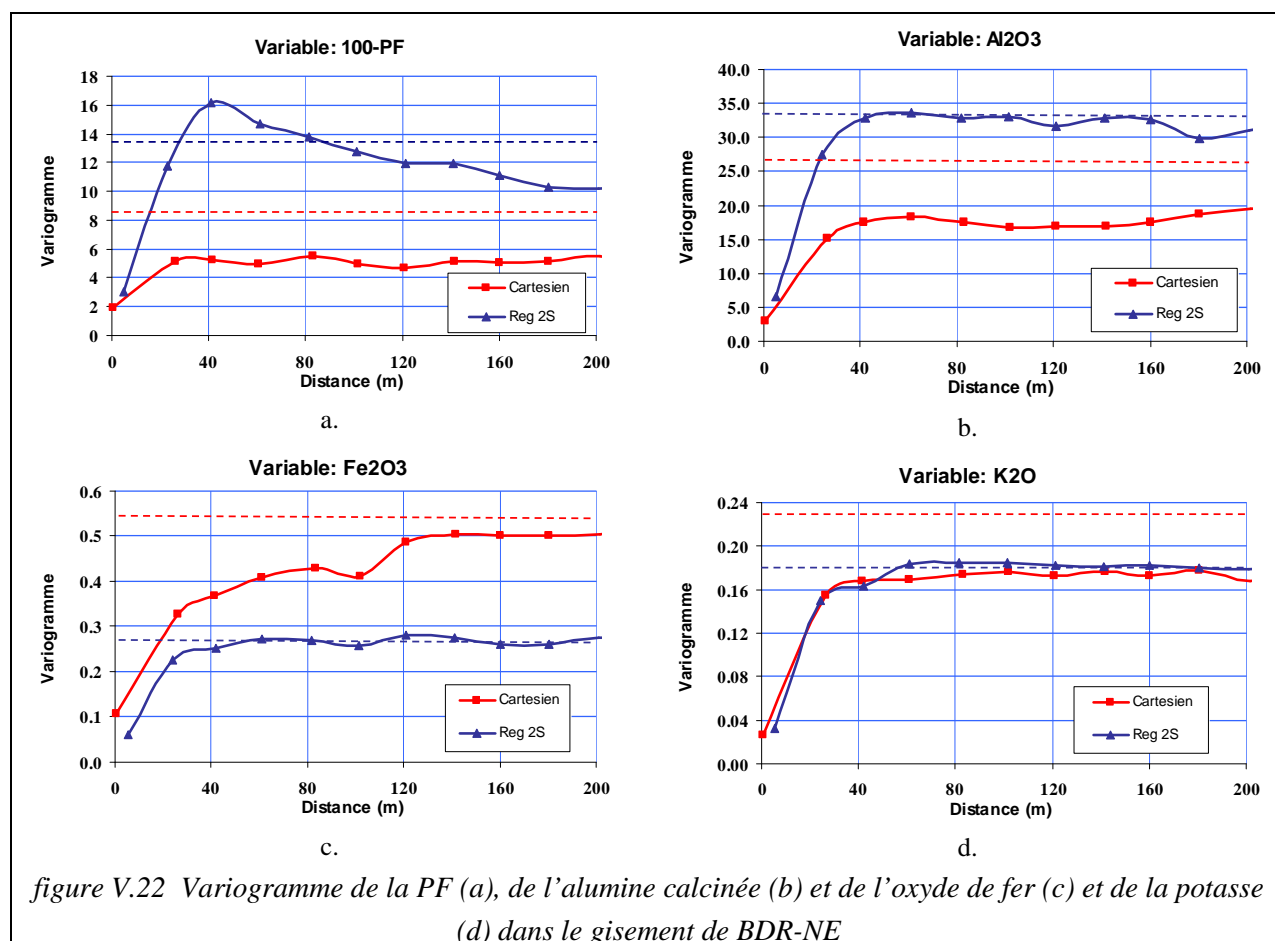
La figure V.22 montre les variogrammes horizontaux calculés pour les variables principales, dans la géométrie cartésienne et dans le nouveau système qui se compose des données régularisées entre deux surfaces. Pour palier l'effet de l'introduction des valeurs par défaut, seulement les échantillons ayant une teneur supérieure à 25% (comme valeur donnée par défaut pour les argiles sableuses) ont été retenus dans le calcul des variogrammes.

La première différence entre les variogrammes de ces deux géométries, est que dans la géométrie régularisée on ne constate pas que tous les variogrammes arrivent à un palier. La variance des échantillons est présentée par une ligne en pointillé dans chaque cas. Pour la perte au feu, le variogramme montre un effet de trou très important (figure V.22.a). Pour toutes les autres variables, on constate des modèles stationnaires avec des paliers distincts. Dans la géométrie cartésienne, les variogrammes de toutes ces variables, comme on l'attendait, présentent une anisotropie structurale ou zonale. La variation dans la direction verticale est plus importante que dans la direction horizontale.

Cette différence provient de la façon dont des données sont mises en relation, comme cela a été exposé et schématisé à l'aide de la figure V.19. La mise en relation des échantillons au fond d'un sondage assez long (où l'épaisseur du kaolin devient importante) avec les segments régularisés d'un échantillon de la séquence la plus superficielle (en bordure du gisement) masque complètement l'anisotropie zonale existante.

Cela se manifeste avec des paliers des variogrammes horizontaux qui restent au dessus de la variance totale. En revanche le palier du variogramme vertical dépasse généralement la valeur de la variance totale des données.

Pour l'alumine le variogramme cartésien ressemble au variogramme avec la nouvelle géométrie. Cela est aussi le cas pour les variogrammes de la potasse. Les variogrammes expérimentaux du fer sont très différents, le variogramme cartésien montre une structuration étendue ayant une portée de 120 m, qui est environ deux fois supérieure à celle obtenue sur la nouvelle géométrie.



La lithologie du gisement, qui est une variable qualitative, peut être modélisée grâce à l'indicatrice. La fonction d'indicatrice peut prendre deux valeurs en sortie : le résultat de la fonction est égal à 1, si l'échantillon est conforme à la condition imposée, sinon la fonction prend une valeur nulle. On présente dans la figure V.23 le variogramme de l'indicatrice de la teneur en alumine supérieure à 30%. Ces argiles seront exploitées par l'entreprise. L'idée est faire une comparaison entre les variogrammes de l'indicatrice du kaolin dans les deux cas. La variance de l'indicatrice dans la géométrie cartésienne est très proche de 0.24 donc 60 ou 40% des données ont une valeur d'indicatrice de 1. Pour la géométrie englobant le gisement, la portion des kaolins ayant une teneur d' Al_2O_3 supérieure à 30%, atteint 73%. Comme le cas des variables chimiques, le variogramme horizontal dans la géométrie cartésienne reste au dessous de la valeur de la variance des données, ce qui n'est pas le cas pour d'autres géométries.

A part une légère différence pour les deux premiers pas du variogramme, les deux variogrammes sont très similaires du point de vue de leurs formes. Il est difficile de définir la cause de la baisse du palier du variogramme par rapport au variogramme standard. Le découpage des échantillons peut aussi diminuer artificiellement cette valeur. En tout cas, il est évident que la conséquence de ce changement de géométrie est l'amélioration de la corrélation entre les données. La complexité géométrique du gisement empêcherait d'avoir d'une amélioration sensible.

La figure V.23.b présente le nombre de paires de données utilisées dans le calcul de chaque variogramme. En moyenne, il a été multiplié par 3.

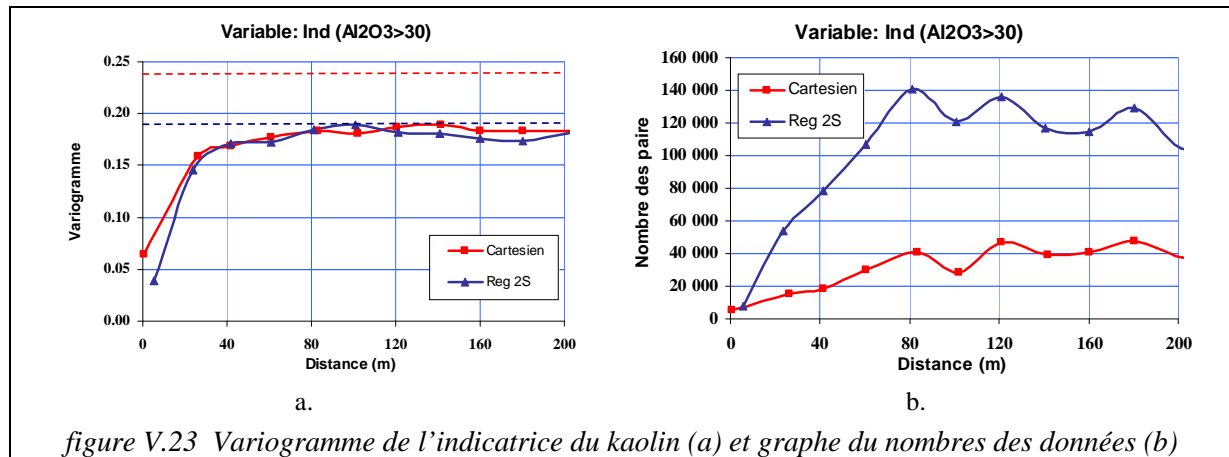


figure V.23 Variogramme de l'indicatrice du kaolin (a) et graphe du nombre des données (b)

On peut conclure cette partie par les remarques suivantes :

- Imposer la géométrie réelle pour le calcul du variogramme et pour la mise en relation des données (définition du voisinage) paraît important. La définition des surfaces limitantes du gisement aide à mieux comprendre la géométrie du dépôt (ou des dépôts) et l'évaluation générale de leur volume.
- Cette démarche ne peut pas être toujours efficace. D'une part, dans le cas de l'existence de dépôts superposés, l'utilisation des deux surfaces englobant la totalité du gisement peut aboutir à une corrélation spatiale artificielle entre les échantillons. Ce qui viendra ensuite, contrôler les poids de krigeage et le voisinage de l'estimation. D'autre part, cela pose des problèmes pour le découpage des échantillons et induit une pondération arbitraire des échantillons.
- Vu la pente généralement faible des dépôts, le changement de la géométrie n'influence pas sensiblement le résultat de l'estimation dans les cas de l'utilisation d'un voisinage de rayon de recherche réduit.

V.2.5. Définition de la limite du gisement ou cadre de l'estimation

Tout d'abord, parce que la minéralisation est l'objet de l'étude, les échantillons utilisés pour le calcul du variogramme ne devraient pas inclure les échantillons stériles. Avec la généralisation des bases de données automatisées, nous faisons habituellement enregistrer toutes les catégories d'échantillons, qu'ils soient minéralisés ou pas. Il est également important d'intégrer dans le calcul, tous les échantillons minéralisés. On a, par ailleurs, déjà examiné le traitement des données manquantes.

De façon classique, l'estimation s'effectue à l'intérieur d'une enveloppe définie, cette enveloppe peut être utilisée également pour définir les données qui participeront au calcul du variogramme et/ou à l'estimation. La définition des limites du gisement peut paraître arbitraire, surtout lorsque la minéralisation n'est pas définie par des limites brutales ou n'est pas associée à une structure géologique connue. Dans les dépôts avec des contacts marqués (par exemple beaucoup de gisements de charbon) la géométrie peut être relativement simple, bien qu'il puisse toujours y avoir une incertitude provoquée par le manque d'information, par exemple sur l'endroit des failles ou des échantillons lessivés (récupération faible de carotte). D'autres gisements, tels que les porphyres cuprifères ou les masses minérales disséminées d'or, ont des frontières qui sont mal connues. Ces limites sont déterminées par une coupure sur la teneur plutôt que par une propriété géologique particulière. Ceci peut également s'appliquer à beaucoup de dépôts de minéraux industriels tels que le kaolin, dans lesquels la valeur du produit est contrôlée par des propriétés physiques ou chimiques qui varient d'une façon assez continue et sans interruption très brutale.

La modélisation géométrique de ces limites est un point très important. Dans les cas où les limites du corps minéralisé ne sont pas géologiquement connues, on doit les déterminer à partir des données de sondages lorsque l'information devient disponible. Cette incertitude à propos de la géométrie du corps minéralisé introduit une seconde source d'erreur.

Matheron (1970) a développé une formule pour l'erreur géométrique relative à l'aire A de la zone minéralisée pour une maille régulière de sondage :

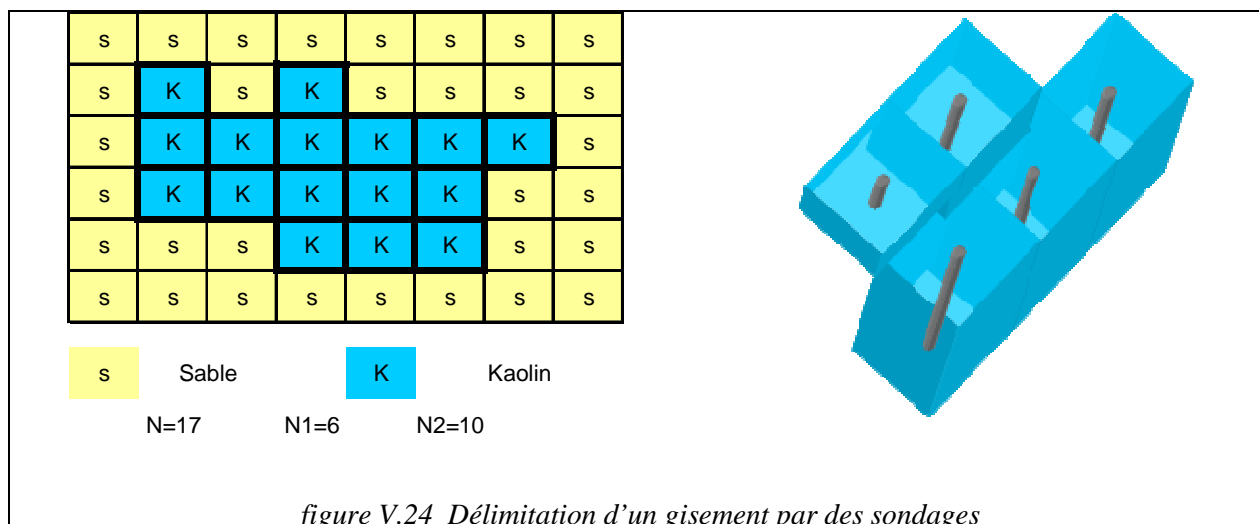
$$\frac{\sigma_A^2}{A^2} = \frac{1}{N^2} \left[\frac{N_2}{6} + 0.061 \frac{N_1^2}{N_2} \right]$$

où $2N_1$ et $2N_2$ représentent le nombre d'éléments frontières parallèles aux axes de la maille de sondage, avec N_1 supérieur ou égal à N_2 , et où N est le nombre total de sondages positifs.

Une formule similaire existe pour les cas à trois dimensions. La figure V.24 montre un domaine contenant des sondages carottés avec des résultats positifs (présence du minerai) ou négatifs (stérile). La formule pour l'erreur géométrique relative au volume V est la suivante :

$$\frac{\sigma_v^2}{V^2} = \frac{S^*}{L^2} * \frac{1}{N^2} \left[0.06\lambda + \frac{\pi}{90} * \frac{1}{\lambda^2} \right]$$

$s^* = N * a_1 * a_2$, λ est le ratio de la dimension de la maille de sondage (a_1/a_2 ; inférieur ou égal à 1) et L est l'épaisseur verticale moyenne.



La question de la géométrie est une des raisons qui empêche l'utilisation de la géostatistique par les exploitants. Pour eux les figures géométriques classiques choisies comme cible d'estimation ne correspondent pas à la forme des lentilles d'argile. Dans le cas de contact entre l'argile et le sable (le passage rapide de l'argile au sable), ou entre des argiles de qualités très différentes, le chef d'exploitation se sent capable de tracer les limites par l'expérience et en utilisant des critères visuels.

L'étude statistique du chapitre précédent a mis en évidence les difficultés d'utilisation des critères visuels pour la distinction des différents types d'argile. Mais en ce qui concerne la limite entre le sable et l'argile, pour éviter la dilution de la teneur, les observations sur le terrain doivent être prises en compte.

V.2.6. Cible d'estimation

Comme conséquence de ce qui précède, il est clair que les échantillons obtenus sur des supports différents créent de sérieux problèmes pour l'établissement de la relation volume/variance. Ce problème n'est pas un problème isolé, et il est compliqué par le mode de fonctionnement dans la plupart des mines de grandes dimensions. Un bloc d'exploitation uniforme, comme c'est le cas dans l'exploitation des minerais métalliques, n'est pas courant (connu) dans une carrière de kaolin ou de sable-et-gravier. On doit, dans la pratique, se satisfaire du choix d'une hauteur standard de banc d'exploitation, souvent basée sur le choix d'équipements ou des considérations de réglementation. Le but des applications de la géostatistique, n'est pas nécessairement de générer un modèle de blocs pour une carrière de kaolin (ou de sable-gravier) puisqu'ils ne seraient pas extraits sous forme de blocs de dimensions identiques (Hack 2003).

Pour aborder ce problème, on propose une méthode différente liée à la méthode d'extraction de l'argile. La première phase de la méthode consiste en l'estimation de l'épaisseur d'argile dans chaque tranche du gisement. Cette méthode est expliquée dans la partie V.4.3. La deuxième phase est basée sur l'estimation de l'indicateur de l'argile (ou du sable). Cette méthode a été utilisée pour l'estimation dans la zone densément échantillonnée de BDR.

V.3. Applications des outils de la géostatistique

V.3.1. Variographie des différents gisements

Malgré les règles géologiques simples qui ont présidé à la formation des gisements d'argiles kaoliniques des Charentes, l'intensité des phénomènes mis en jeu n'était pas identique dans tous les gisements. Comme on a vu précédemment, certains gisements ont subi des phénomènes post sédimentaires très intenses tandis que les gisements simples restent dans le cadre d'une composition kaolinique avec la silice et le mica en tant qu'impuretés principales. Leur géométrie détaillée présente une grande complexité, et la taille et la forme des dépôts d'argile changent d'un gisement à l'autre. L'influence de tous ces facteurs sur la structure spatiale des variables caractérisant le kaolin mène à une situation où les structures spatiales des variables sont distinctes d'un gisement à l'autre.

Dans cette partie, on présente les variogrammes expérimentaux calculés sur les gisements les plus typiques des Charentes. Parmi ces gisements on a choisi les gisements qui ont des échantillons suffisants pour une étude variographique robuste. La figure suivante montre l'implantation des sondages dans chaque gisement. Les gisements Chez-Arlot, Bois Charles, Chierzac et Chez-Maudet sont sondés avec une maille de 20m. La dimension de maille de sondage pour le gisement de Saint-Georges est de 10m. Une partie du gisement de BDR est également échantillonnée par les sondages espacés de 10m de distance. Comme on l'observe sur les cartes, certaines irrégularités sont visibles et dues aux sondages supplémentaires ou aux sondages anciens. Les cartes d'implantation des sondages sont présentées dans la figure V.25.

Cette étude est réalisée sur les données régularisées sur un support d'une longueur d'un mètre pour tous les gisements. Le pas des variogrammes horizontaux est choisi égal à la dimension de la maille des sondages. Pour faciliter la tâche de comparaison, la moyenne des variogrammes horizontaux a été calculée. Autrement dit, les variogrammes sont calculés avec une tolérance angulaire de 90° et une demi-hauteur de tranche inférieure à 1 m (0.99m).

La figure V.26 présente les variogrammes horizontaux de la teneur en alumine brute. Ces variogrammes sont normés par la variance des données prises en compte dans le calcul. Les variogrammes du BDR-10*10 et de Maudet, se comportent de façon très particulière. Ils sont caractérisés par une montée très rapide aux faibles distances. A 20m de distance entre les paires, on a 80% de la variance totale des données. D'autre part, c'est le variogramme de Chierzac qui reste sous la barre de la variance totale même à une distance importante. Entre ces deux cas on trouve le variogramme de Chez-Arlot et le variogramme du gisement de St. Georges qui sont plus continus. A cause de la non-stationnarité de la moyenne, on constate une dérive, aux distances prises en compte.

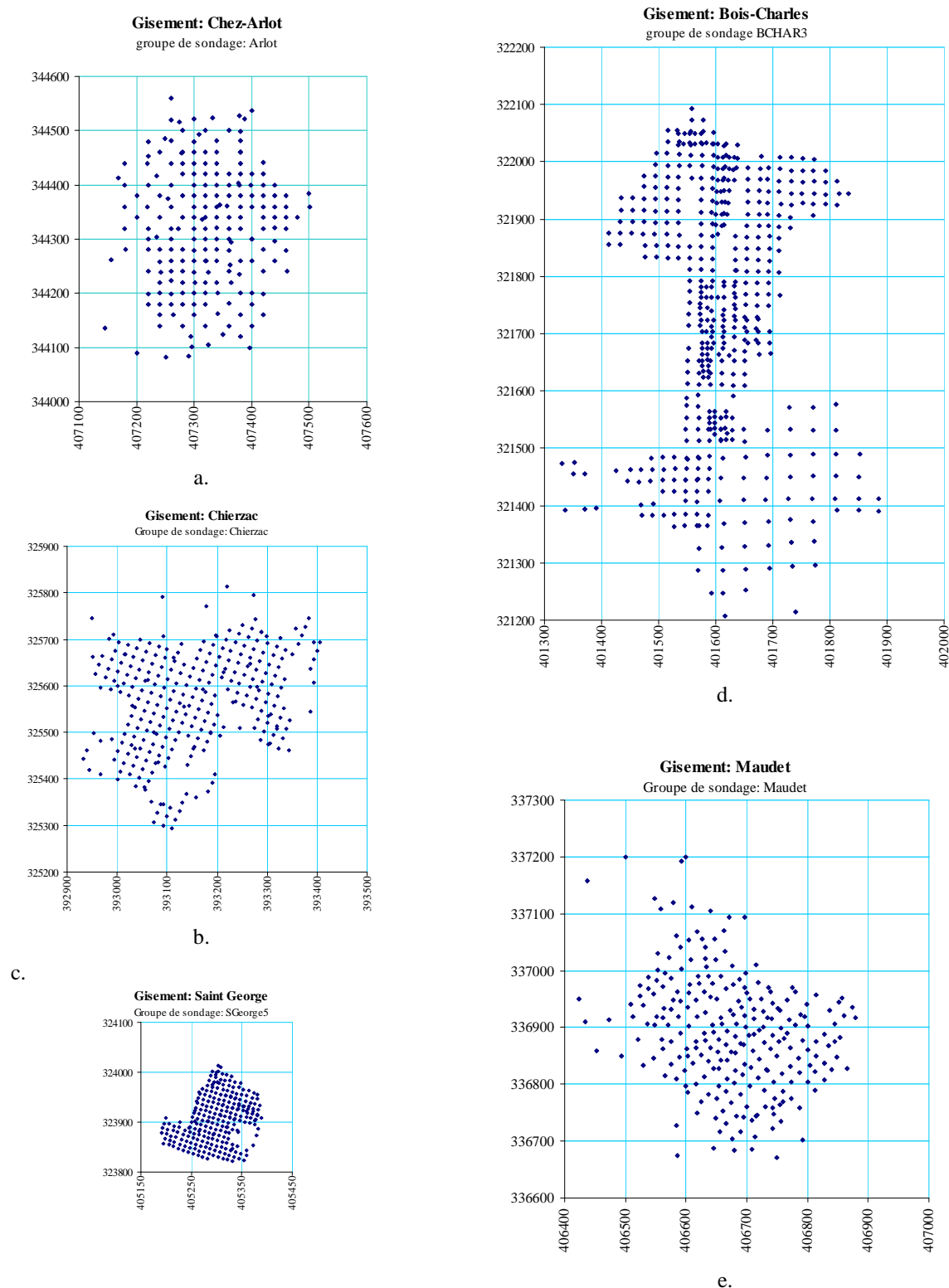
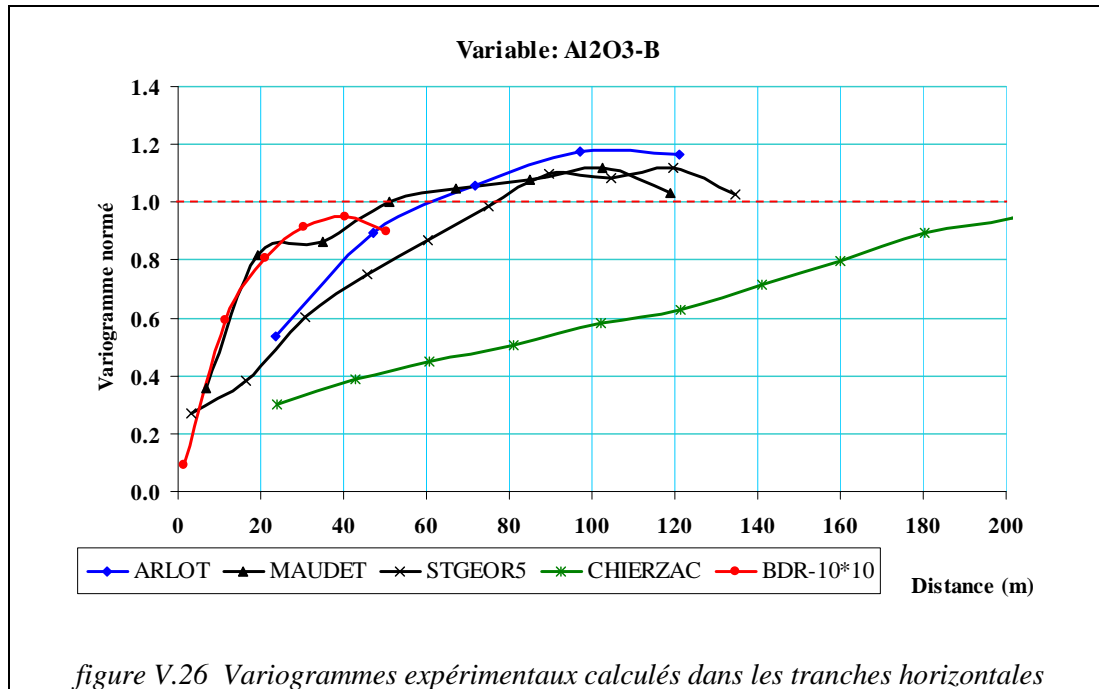


figure V.25 Plan d'implantation des sondages dans les gisements de Chez-Arlot, de Chierzac, St. George, Bois Charles et Chez-Maudet.

Chez Arlot à une maille de 20m (a), de Chierzac à une maille de 20m (b), de saint Georges à une maille de 10m (c), de Bois Charles à une maille de 20m (d) de Chez Maudet à une maille de 20m. Chaque carré sur le plan présente une superficie d'un hectare.



V.3.2. Maille de sondage optimale

La taille d'un gisement et la variabilité spatiale de qualité du minerai sont les deux principaux facteurs de guidage qui jouent un rôle essentiel en déterminant l'espacement optimum entre sondages. La qualité de minerai dans un dépôt est ordonnée par les facteurs géologiques. La variation de ces facteurs géologiques mène à la dissimilitude spatiale de la qualité de minerai à l'intérieur du gisement. Ainsi, les échantillons prélevés très étroitement tendent à refléter la nature homogène d'un dépôt et réciproquement les échantillons à une distance importante présentent sa nature non homogène. Ceci rend nécessaire la formulation d'une stratégie de sondage. L'optimisation de la maille de sondage utilisant des relations géostatistiques de volume-variance a été employée dans le monde entier en ce qui concerne beaucoup de dépôts de minerai surtout pour le charbon (Saikia et al 2006, Noppe 1994, Armstrong 1983, Kim et al 1981).

Le système de krigeage ainsi que la variance de krigeage ne dépendent que de la fonction structurale $C(h)$ ou $\gamma(h)$ et des géométries estimé-estimant et non des valeurs de l'information. En conséquence on peut, connaissant la configuration de l'information et avant d'engager les travaux de forage, prévoir la qualité du krigeage de tel ou tel panneau (Journel 1978). La variance de krigeage permet ainsi de gérer au mieux un budget de reconnaissance. Une fois que l'on sait calculer la variance d'estimation, on peut déterminer la maille de sondage optimale pour une variable particulière (Armstrong 1997).

Ici optimal peut signifier que le maillage doit donner les informations nécessaires avec un minimum de sondages et occasionner le moins de dépenses possibles. Une des stratégies peut être basée sur la limite de la précision de l'estimation. On cherche à définir la maille de sondage avec laquelle l'erreur d'estimation sera inférieure à une limite imposée.

L'optimisation de maille de sondage peut être basée sur la prise en considération de la relation des coûts-rendements. L'amélioration marginale dans l'information acquise peut être comparée au coût marginal de forage d'un sondage supplémentaire. En formulant une stratégie de forage optimale utilisant la variance du krigeage, certaines hypothèses implicites sont faites. Une de ces hypothèses est que le modèle de variogramme utilisé dans le calcul de la variance de krigeage représente bien la variabilité du

gisement. En conséquence, les valeurs d'échantillons disponibles aux étapes successives du forage dans le futur ne devraient pas modifier rigoureusement le type de variogramme et la moyenne de la population des divers paramètres de qualité.

On présente ici, une étude sur le calcul de la variance d'estimation d' $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$, de la PF, de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-B}$ et de $\text{K}_2\text{O-B}$ dans trois gisements différents. Le gisement Chierzac est connu en tant que gisement du type nappe et sans argile hyperalumineuse. En revanche, le gisement BDR-NE est un gisement très riche en alumine et chenalisé (moins important que la partie Sud-ouest du gisement BDR). Le gisement St. Georges est un gisement kaolinique à variabilité moins importante. Le premier sondage, en reconnaissance dite tactique (T1) est foré sur une maille de 56.5m, sur le centre d'une cellule de 80m*80m (Tableau V.5 et figure V.27).

La variance d'estimation est calculée pour l'estimation d'un bloc ayant la même taille que la maille de sondage pour chaque étape. L'estimation de l'étape 0 commence par les quatre sondages de type S3, sur un bloc de taille 80*80 centré sur le centre (0,0).

Tableau V.5 Maille de sondage aux différentes étapes d'exploration

Type	S3	T1	T2	T3	T4	T4/T5	T5
Configuration	80*80	56.5*56.5	40*40	28*28	20*20	15*15	10*10
Nombre total	4	5	9	13	25	41	81
sondages ajoutés	4	1	4	4	12	16	40
Sondage de cellule	0	1	1	5	9	25	49
Entre 2 cellules	0	0	4	4	12	12	28
Entre 4 cellules	4	4	4	4	4	4	4
Nombre par cellule	1	2	4	8	16	32	64
Ajouté par cellule		1	2	4	8	16	32

A ce stade, on utilise seulement le variogramme horizontal pour avoir la précision minimale. Dans l'étape suivante, l'estimation sera faite par 5 sondages, les quatre sondages de S3 avec un nouveau sondage de T1 sur un bloc de taille 56.5*56.5. Ensuite on ajoute les quatre sondages de T2 pour estimer d'un bloc de taille 40*40 centré sur l'origine (figure V.28). La précision de l'estimation est présentée en tenant compte de l'écart type de l'erreur d'estimation et pour le quantile à 95% de confiance ($1.96*s$).

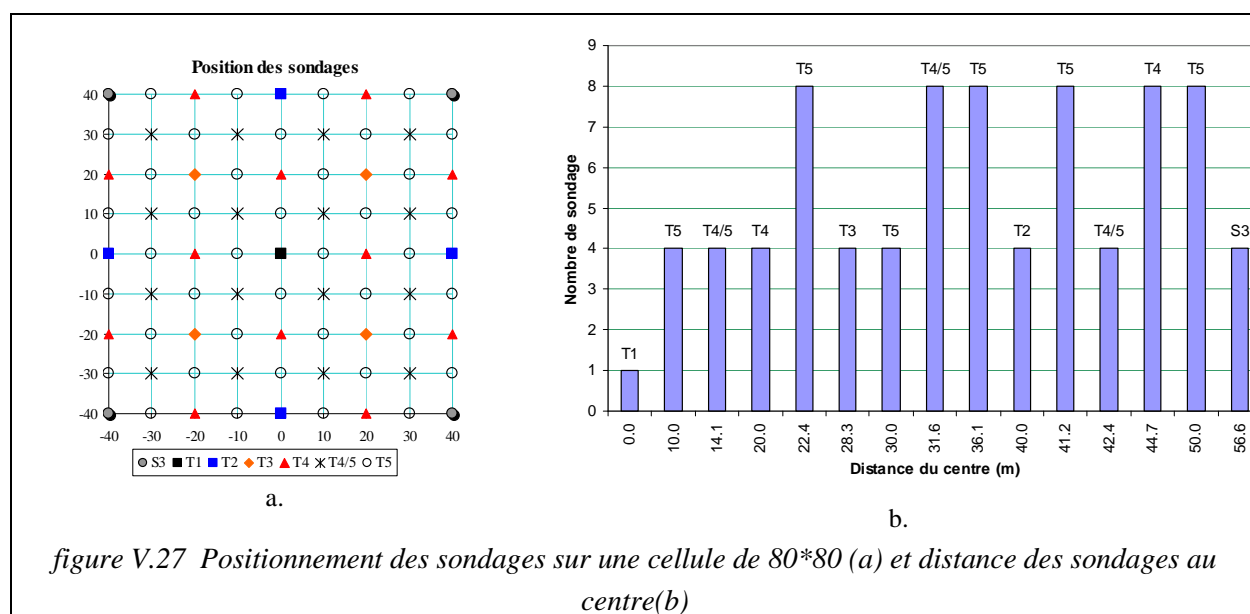
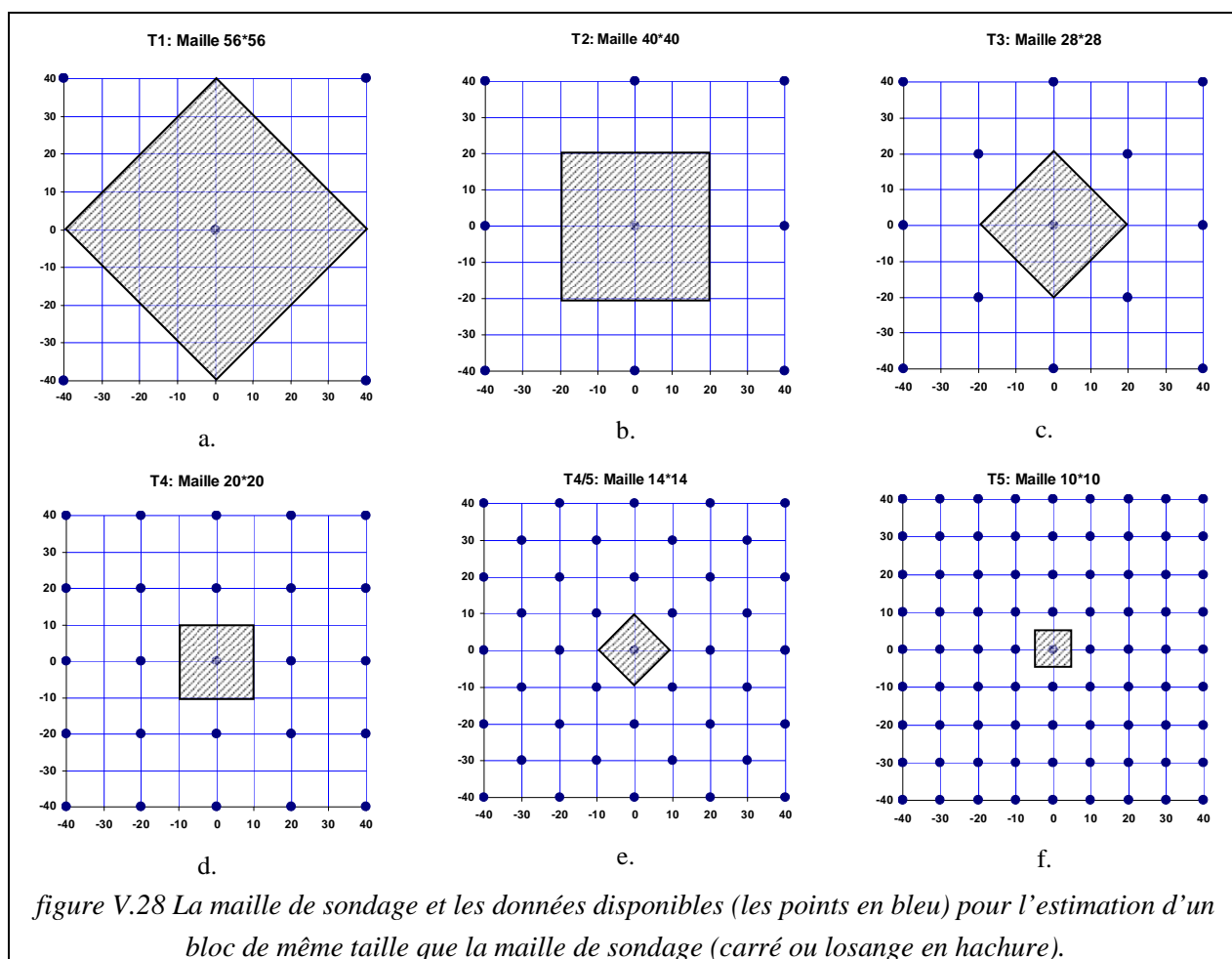


figure V.27 Positionnement des sondages sur une cellule de 80*80 (a) et distance des sondages au centre(b)

L'amélioration de la précision est étudiée en la comparant avec la précision de l'étape zéro. Cette amélioration exprimée en pourcentage est calculée en divisant l'écart de précision de chaque étape par la précision de l'étape zéro (Base S3). On regarde ensuite l'amélioration de la précision étape par étape. Dans cette phase de calcul, l'écart de précision entre les deux stades successifs est divisé par la précision de l'étape préliminaire et présenté en pourcentage. Pour se rapprocher d'un concept économique, on fait entrer dans le système le nombre des sondages qui sont ajoutés au système à chaque nouvelle étape. On divise alors l'amélioration de chaque étape par le nombre des sondages ajoutés. On en déduit l'amélioration marginale apportée par chaque sondage.

L'utilisation du nombre des nouveaux sondages à chaque étape est valable dans le cas d'une cellule isolée, tandis que par exemple chaque sondage S4 qui est situé au coin d'une cellule, participe à l'estimation, des quatre cellules voisines. On peut calculer le nombre propre des sondages par cellule qui prend en compte ce fait en utilisant un poids pour les sondages (n sondages) communs entre deux ou quatre cellules ($n/2$ ou $n/4$). En tout cas, la réalité se situe entre ces deux cas. Pour les petits gisements, on est proche du cas d'une cellule isolée et pour les gisements assez grands, le chiffre s'approche de celui d'une grille continue.



Les variogrammes calculés pour les quatre variables mentionnées peuvent être représentés par les équations suivantes :

$$\lambda_{Al_2O_3-b}(h) = 2.5 * Sph(h/20) + 6.5 * Sph(h/50) + 4.0 * Lin(h/800)$$

$$\lambda_{PF}(h) = 1.0 * Sph(h/20) + 2.5 * Sph(h/50) + 2.5 * Lin(h/1000)$$

$$\lambda_{Fe_2O_3-b}(h) = 0.1 * Sph(h/20) + 0.12 * Sph(h/120) + 0.06 * Lin(h/800)$$

$$\lambda_{K_2O-b}(h) = 0.06 * Sph(h/20) + 0.06 * Sph(h/50) + 0.06 * Lin(h/800)$$

Les variogrammes horizontaux ne sont pas proportionnels, mais on constate la similarité des éléments les composant. L'anisotropie structurale (zonale) est modélisée grâce au modèle linéaire. Pour éviter l'effet des valeurs aberrantes, le calcul du variogramme de Fe_2O_3 est limité aux échantillons ayant une teneur en fer (Fe_2O_3) inférieure à 5%. La limite de 2% est retenue pour le calcul du variogramme de K_2O-B . Pour la perte au feu, l'alumine brute et la potasse brute les deux structures sphériques atteignent leurs paliers seulement à 20m et à 50m. Presque un tiers de la variance est expliquée par le modèle linéaire qui met en évidence la zonalité verticale du gisement.

Une série des codes écrits pour MATLAB a permis de calculer la variance d'estimation et la moyenne du variogramme à l'intérieur du bloc. Elle est prise comme la variance à l'intérieur des blocs. On observe la conséquence directe de l'écart-type très important de la teneur en alumine brute et de la PF sur la variance de l'erreur d'estimation. Une maille de sondage de 20*20 peut assurer une précision de 1% pour l'erreur d'estimation pour la PF, tandis que cela est n'est pas accessible même par une maille de 10*10 pour l'estimation de l'alumine brute.

Tableau V.6 Récapitulatif de la précision de l'estimation aux différentes étapes pour le gisement BDR-NE

(voir commentaires dans le texte)

Variable	Type	Config.	γ_{vv}	Variance	Portion	Précision	Amélioration		Amélior. par	
				$\epsilon(KO)$		95%	Base S3	Par étape	Nb	Cellule
Al ₂ O ₃ -B	S3	80*80	7.93	2.669	20.5	3.20				
	T1	56.5*56.5	7.08	1.834	14.1	2.65	17.1	17.1	17.1	17.1
	T2	40*40	5.93	1.378	10.6	2.30	28.1	13.3	3.3	6.7
	T3	28*28	4.74	1.147	8.8	2.10	34.5	8.8	2.2	2.2
	T4	20*20	3.67	0.754	5.8	1.70	46.9	18.9	1.6	2.4
	T4/T5	14*14	2.71	0.536	4.1	1.43	55.2	15.7	1.0	1.0
	T5	10*10	1.96	0.395	3.0	1.23	61.5	14.1	0.4	0.4
PF	S3	80*80	3.14	1.043	17.4	2.00				
	T1	56.5*56.5	2.79	0.726	12.1	1.67	16.6	16.6	16.6	16.6
	T2	40*40	2.35	0.539	9.0	1.44	28.1	13.8	3.5	6.9
	T3	28*28	1.88	0.447	7.4	1.31	34.6	9.0	2.2	2.2
	T4	20*20	1.45	0.294	4.9	1.06	46.9	18.9	1.6	2.4
	T4/T5	14*14	1.07	0.209	3.5	0.90	55.3	15.7	1.0	1.0
	T5	10*10	0.78	0.152	2.5	0.76	61.8	14.7	0.4	0.5
Fe ₂ O ₃ -B	S3	80*80	0.16	0.049	17.6	0.44				
	T1	56.5*56.5	0.14	0.038	13.4	0.38	12.8	12.8	12.8	12.8
	T2	40*40	0.12	0.029	10.5	0.34	22.8	11.5	2.9	5.8
	T3	28*28	0.10	0.023	8.2	0.30	31.7	11.4	2.9	2.9
	T4	20*20	0.08	0.016	5.7	0.25	43.1	16.7	1.4	2.1
	T4/T5	14*14	0.06	0.012	4.5	0.22	49.7	11.6	0.7	0.7
	T5	10*10	0.05	0.009	3.3	0.19	56.7	13.9	0.3	0.4
K ₂ O-B	S3	80*80	0.11	0.035	19.3	0.37				
	T1	56.5*56.5	0.10	0.027	14.9	0.32	12.2	12.2	12.2	12.2
	T2	40*40	0.09	0.021	11.7	0.28	22.1	11.2	2.8	5.6
	T3	28*28	0.07	0.018	9.7	0.26	29.0	8.9	2.2	2.2
	T4	20*20	0.06	0.012	6.7	0.21	41.2	17.2	1.4	2.2
	T4/T5	14*14	0.04	0.009	4.8	0.18	49.9	14.8	0.9	0.9
	T5	10*10	0.03	0.007	3.6	0.16	56.8	13.7	0.3	0.4

L'amélioration de l'estimation est très importante pour la première étape. En ajoutant seulement un sondage on baisse l'erreur d'estimation de 13 à 18%. Au fur et à mesure, la baisse de l'erreur devient de plus en plus coûteuse, par exemple pour avoir le même taux de baisse de l'erreur à partir d'une maille 28*28m, entre 9 à 12 sondages supplémentaires seront nécessaires pour chaque cellule. Selon le Tableau V.6, et les indications de variabilité souhaitées par l'exploitant, une maille de 20*20 est souhaitable pour le gisement BDR-NE.

Comme on a vu précédemment le gisement de Chierzac est plus régulier que le gisement de BDR, la variance de l'Alumine et de la PF sont relativement faibles. La variance de la PF est égale à 1. Les variogrammes horizontaux du gisement Chierzac sont calculés comme expliqué pour le gisement BDR-NE.

$$\lambda_{Al_2O_3-b}(h) = 1.8 * Sph(h/30) + 6.8 * Sph(h/300)$$

$$\lambda_{PF}(h) = 0.28 * Sph(h/40) + 0.78 * Sph(h/300)$$

$$\lambda_{Fe_2O_3-b}(h) = 0.08 * Cub(h/30) + 0.13 * Sph(h/225)$$

$$\lambda_{K_2O-b}(h) = 0.008 * Cub(h/20) + 0.020 * Sph(h/300)$$

La variance de l'alumine brute est égale à 8.6 ce qui est environ deux tiers de la variance de l'alumine de BDR-NE. Le modèle se révèle plus continu et la structure a une portée plus petite (30m) représentant seulement 20% de la variance totale. Le reste est représenté par un modèle sphérique d'une portée de 300m. Pour l'oxyde de fer et la potasse, on constate une continuité à l'origine grâce à la variographie au long des sondages. Cela nous permet d'utiliser un modèle cubique (ou gaussien), comme première structure.

Remarque : les variogrammes sont calculés sur les échantillons régularisés sur les supports d'une longueur de 1m. Le découpage des échantillons longs en des segments plus petits, peut artificiellement baisser la somme des carrés des écarts pour le premier pas du variogramme vertical et induire par conséquent une impression de continuité (une pente faible à l'origine). Les variogrammes verticaux de l'oxyde de fer et de la potasse montrent une pente faible à l'origine, cela n'est pas vu dans le cas des variogrammes de l'alumine et de la perte au feu. Pour cela on a préféré utiliser le modèle cubique pour le variogramme de Fe_2O_3-B et de K_2O-B .

Malgré la continuité observée sur les variogramme verticaux, la portée du modèle cubique est seulement de 30m pour la variable de Fe_2O_3-B et de 20m pour K_2O-B , et leurs paliers présentent environ 40% et 30% de leurs variances respectives. La variance de la potasse est très faible.

En conséquence, on s'attend à ce qu'une maille plus grande soit suffisante pour répondre au même niveau de précision d'estimation souhaité que pour le gisement BDR-NE. On peut obtenir une précision d'estimation en alumine pour le gisement Chierzac avec une maille de 40*40, supérieur à celle d'une maille 20*20 pour le gisement BDR (N'oublions pas que dans ces calculs la taille des blocs est choisie égale à la maille de sondage).

Le Tableau IV.7 récapitule le résultat de la précision de l'estimation en tranche horizontale pour le gisement Chierzac. Pour ce gisement une maille de 40*40 est largement suffisante pour ce qui concerne le niveau de précision de l'estimation pour les quatre variables principales.

Le gisement de Saint-Georges a été classé par Delineau (1994), comme le Bois Charles, en gisement d'argile kaolinique blanche à mica (type III). La variation des variables chimiques est faible comme on l'a vu dans IV.6. La structure spatiale se montre plus robuste que celle du gisement de BDR, mais moins continue que celle de Chierzac.

Les équations suivantes montrent les résultats d'une étude variographique sur les échantillons régularisés sur un support d'une longueur de 1m. La variographie le long des sondages témoigne de l'absence d'un effet de pépite important. Les modèles ne sont pas stationnaires. Le variogramme de Fe_2O_3 est calculé en masquant les échantillons ayant une teneur de Fe_2O_3 supérieure à 2%. Ces échantillons sont rares dans ce gisement. Le modèle, sauf pour le $\text{K}_2\text{O-B}$, se compose d'un modèle sphérique à une faible portée, le reste étant expliqué par un modèle linéaire.

Tableau V.7 Récapitulatif de la précision de l'estimation aux différentes étapes pour le gisement Chierzac

(voir commentaires dans le texte)

Variable	Type	Config.	γ_{vv}	Variance	Portion	Précision	Amélioration		Amélior. par	
				$\epsilon(\text{KO})$		95%	Base S3	Par étape	Nb	Cellule
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$	S3	80*80	3.08	0.928	10.9	1.89				
	T1	56.5*56.5	2.56	0.662	7.8	1.59	15.5	15.5	15.5	15.5
	T2	40*40	2.10	0.467	5.5	1.34	29.0	16.0	4.0	8.0
	T3	28*28	1.64	0.317	3.7	1.10	41.5	17.6	4.4	4.4
	T4	20*20	1.22	0.246	2.9	0.97	48.5	11.9	1.0	1.5
	T4/T5	14*14	0.89	0.179	2.1	0.83	56.1	14.8	0.9	0.9
	T5	10*10	0.64	0.118	1.4	0.67	64.3	18.6	0.5	0.6
PF	S3	80*80	0.41	0.131	13.8	0.71				
	T1	56.5*56.5	0.34	0.084	8.8	0.57	20.0	20.0	20.0	20.0
	T2	40*40	0.27	0.053	5.6	0.45	36.5	20.6	5.1	10.3
	T3	28*28	0.20	0.040	4.2	0.39	44.9	13.2	3.3	3.3
	T4	20*20	0.15	0.030	3.1	0.34	52.5	13.8	1.2	1.7
	T4/T5	14*14	0.10	0.019	2.0	0.27	61.6	19.2	1.2	1.2
	T5	10*10	0.07	0.014	1.5	0.23	67.4	15.1	0.4	0.5
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-B}$	S3	80*80	0.11	0.033	15.9	0.36				
	T1	56.5*56.5	0.10	0.026	12.3	0.31	12.2	12.2	12.2	12.2
	T2	40*40	0.08	0.019	9.1	0.27	24.5	14.0	3.5	7.0
	T3	28*28	0.07	0.012	5.6	0.21	40.8	21.6	5.4	5.4
	T4	20*20	0.05	0.005	2.5	0.14	60.4	33.1	2.8	4.1
	T4/T5	14*14	0.03	0.002	1.2	0.10	73.1	32.0	2.0	2.0
	T5	10*10	0.02	0.001	0.7	0.08	78.8	21.4	0.5	0.7
$\text{K}_2\text{O-B}$	S3	80*80	0.01	0.003	12.1	0.11				
	T1	56.5*56.5	0.01	0.003	9.7	0.10	10.4	10.4	10.4	10.4
	T2	40*40	0.01	0.002	7.6	0.09	20.7	11.5	2.9	5.8
	T3	28*28	0.01	0.002	6.5	0.08	26.9	7.8	1.9	1.9
	T4	20*20	0.01	0.001	4.4	0.07	39.8	17.6	1.5	2.2
	T4/T5	14*14	0.00	0.001	2.1	0.05	58.3	30.8	1.9	1.9
	T5	10*10	0.00	0.000	0.9	0.03	72.7	34.4	0.9	1.1

En comparant les modèles mentionnés ci-dessus, avec ceux des deux gisements précédents, on s'attend à avoir des résultats plus proches des résultats de Chierzac. Les variances de la perte au feu, de la potasse brute, de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-B}$ sont assez faibles pour qu'on puisse assurer une précision d'estimation acceptable avec une maille de sondage large.

$$\lambda_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{-b}}(h) = 1.60 * \text{Sph}(h/25) + 4.22 * \text{Lin}(h/100)$$

$$\lambda_{\text{PF}}(h) = 0.31 * \text{Sph}(h/15) + 1.16 * \text{Lin}(h/120)$$

$$\lambda_{\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-b}}(h) = 0.009 * \text{Sph}(h/20) + 0.008 * \text{Lin}(h/200)$$

$$\lambda_{\text{K}_2\text{O-b}}(h) = 0.059 * \text{Lin}(h/60)$$

Les résultats sont présentés dans le Tableau V.8. Avec une maille de sondage 40*40 la précision d'estimation sur la teneur en Al_2O_3 est inférieure à 1.5%. Au stade de T2, on constate une amélioration de 27.3% par rapport à celle de la cellule de base (Maille S3). L'amélioration finale (stade T5) présente 62.4% d'amélioration. Cela veut dire que les 5 sondages supplémentaires primaires portent plus que 40% d'amélioration de la précision par rapport au meilleur cas, pour un total de 81 sondages.

Une maille de sondage de 28*28 sera largement suffisante pour assurer la précision d'estimation de ces paramètres principaux au dessous d'un niveau acceptable d'évaluation du gisement.

Pour pouvoir comparer les résultats de ces gisements, on calcule la variance d'estimation sur un bloc de base de 80*80, et un bloc de 40*40 centrés sur l'origine. A chaque stade, on utilise toutes les données disponibles dans la cellule pour estimer la teneur moyenne du bloc.

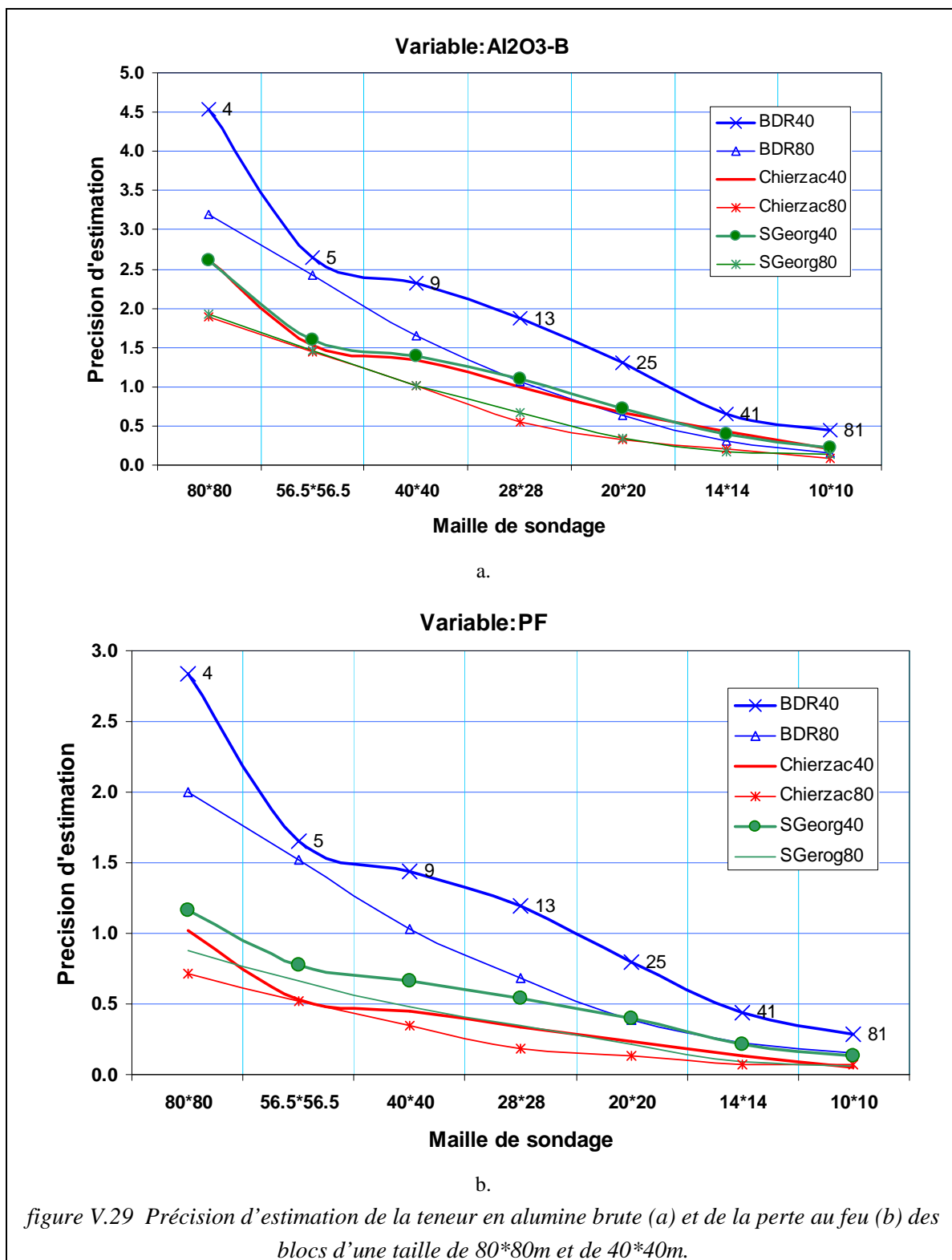
La figure V.29.a montre la précision de l'estimation de la teneur en alumine brute. Pour les blocs les plus grands on s'attendrait à un meilleur gain relatif de précision. La pente de la ligne liant deux étapes successives est un indice de l'efficacité de l'investissement pour avoir des informations supplémentaires. Pour le bloc 40*40 le fait de forer un sondage au centre de la maille S3 présente un intérêt très important. Pour le bloc de 80*80 l'amélioration de la précision de l'estimation se révèle plus difficile à faire.

Tableau V.8 Récapitulatif de la précision de l'estimation aux différentes étapes pour le gisement Saint-Georges.

Variable	Type	Config.	γ_{vv}	Variance	Portion	Précision	Amélioration		Amélior. par	
				$\epsilon(KO)$		95%	Base S3	Par étape	Nombre	Cellule
Al_2O_3 -B	S3	80*80	3.26	0.967	19.7	1.93				
	T1	56.5*56.5	2.69	0.686	14.0	1.62	15.8	15.8	15.8	15.8
	T2	40*40	2.20	0.512	10.4	1.40	27.3	13.6	3.4	6.8
	T3	28*28	1.76	0.365	7.5	1.18	38.5	15.5	3.9	3.9
	T4	20*20	1.34	0.260	5.3	1.00	48.2	15.7	1.3	2.0
	T4/T5	14*14	0.98	0.199	4.1	0.88	54.6	12.4	0.8	0.8
	T5	10*10	0.71	0.136	2.8	0.72	62.4	17.3	0.4	0.5
PF	S3	80*80	0.70	0.202	20.8	0.88				
	T1	56.5*56.5	0.58	0.144	14.8	0.74	15.6	15.6	15.6	15.6
	T2	40*40	0.49	0.116	11.9	0.67	24.3	10.3	2.6	5.2
	T3	28*28	0.41	0.098	10.1	0.61	30.3	8.0	2.0	2.0
	T4	20*20	0.34	0.075	7.7	0.54	39.1	12.6	1.1	1.6
	T4/T5	14*14	0.27	0.052	5.3	0.45	49.4	16.9	1.1	1.1
	T5	10*10	0.20	0.041	4.2	0.40	55.0	11.0	0.3	0.3
Fe_2O_3 -B	S3	80*80	0.01	0.003	17.0	0.11				
	T1	56.5*56.5	0.01	0.002	14.3	0.10	8.3	8.3	8.3	8.3
	T2	40*40	0.01	0.002	11.0	0.08	19.5	12.2	3.1	6.1
	T3	28*28	0.01	0.002	9.4	0.08	25.5	7.4	1.9	1.9
	T4	20*20	0.01	0.001	7.0	0.07	35.7	13.7	1.1	1.7
	T4/T5	14*14	0.00	0.001	5.7	0.06	42.3	10.2	0.6	0.6
	T5	10*10	0.00	0.001	4.3	0.05	49.8	13.0	0.3	0.4
K_2O -B	S3	80*80	0.04	0.012	20.1	0.22				
	T1	56.5*56.5	0.03	0.005	9.1	0.14	32.7	32.7	32.7	32.7
	T2	40*40	0.02	0.004	6.5	0.12	43.3	15.8	3.9	7.9
	T3	28*28	0.01	0.003	4.4	0.10	53.1	17.2	4.3	4.3
	T4	20*20	0.01	0.002	3.1	0.08	61.0	16.9	1.4	2.1
	T4/T5	14*14	0.01	0.001	2.2	0.07	66.7	14.7	0.9	0.9
	T5	10*10	0.01	0.001	1.6	0.06	72.1	16.2	0.4	0.5

(voir commentaires dans le texte)

En ce qui concerne de la précision sur l'estimation de la teneur en $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$, le gisement BDR-NE se distingue des gisements de Chierzac et de St Georges qui se comportent d'une façon très similaire. Dans la figure V.29.b, on distingue très bien les courbes de la baisse de la précision de l'estimation de la perte au feu pour ces trois gisements.



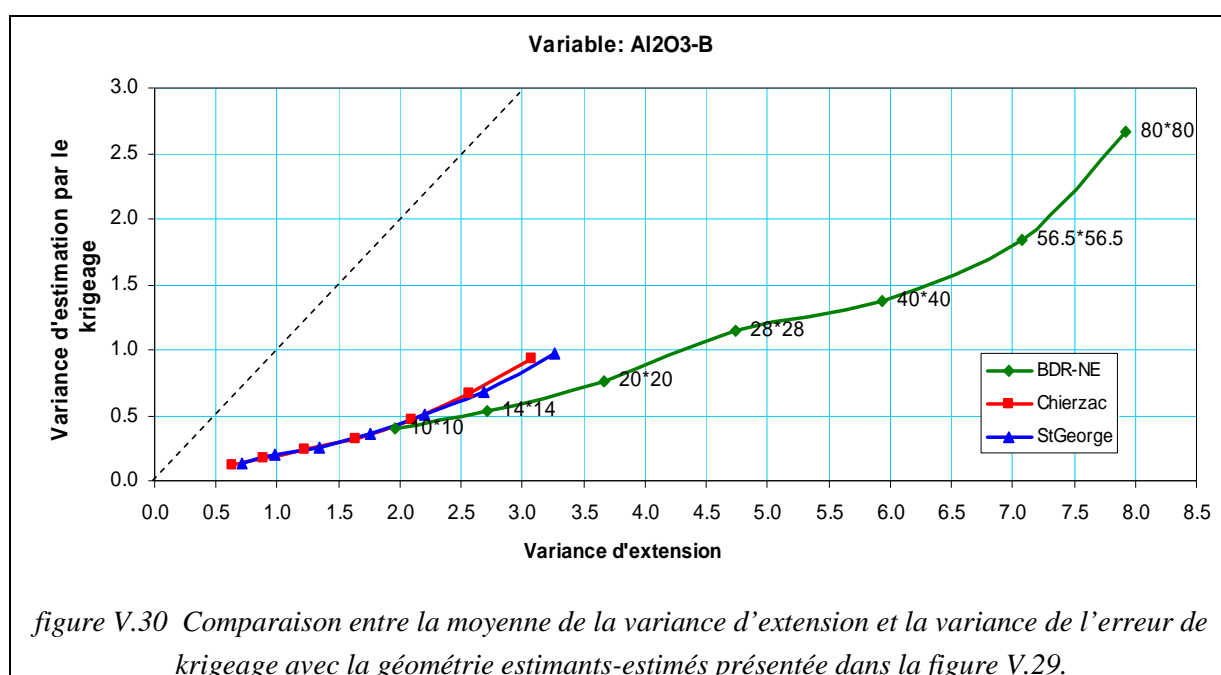
Pour définir la taille optimale de la maille de sondage en vue d'assurer une erreur d'estimation inférieure à une limite souhaitée, l'étude de la structure spatiale est nécessaire. L'étude variographique, à la fin de chaque phase de forage, permet d'examiner la nécessité du passage à une maille de sondage plus

serrée. Cette étude montre qu'une maille de sondage de 40*40 sera suffisante pour les gisements les plus continus tels que Chierzac et St. Georges, tandis que pour le Bois des Rentes la maille de sondage doit être plus serrée (au moins 20*20).

V.3.3. Comparaison du krigeage avec la méthode du plus proche voisin (PPV)

Dans la méthode du plus proche voisin, on étend la valeur d'un point échantillonné situé à l'intérieur d'un bloc à la totalité du bloc, en tant que valeur moyenne du bloc. Dans le cas de l'échantillonnage sur une maille régulière cette méthode correspond à la méthode du polygone d'influence.

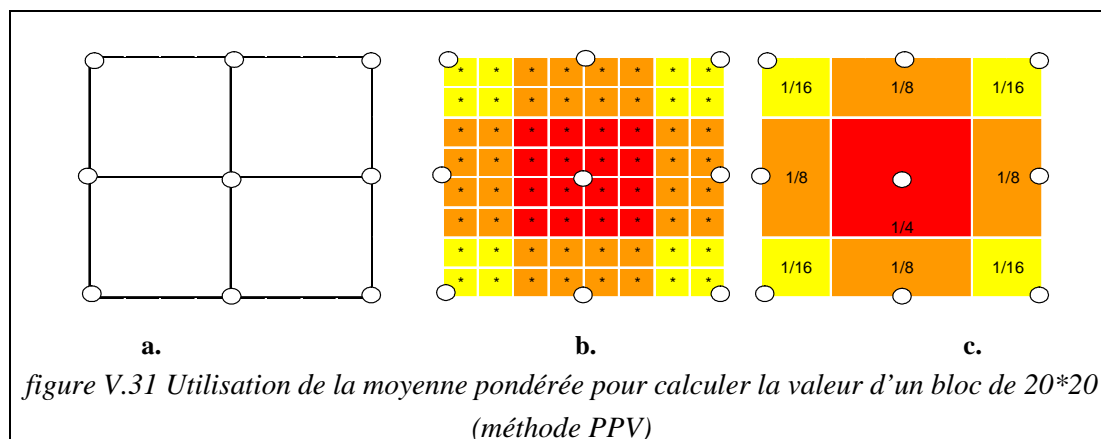
Théoriquement, on peut comparer ces deux méthodes du point de vue de la précision de l'estimation. Si le positionnement du point dont on étend la valeur au bloc est aléatoire, alors la moyenne de la variance d'extension coïncide avec la moyenne du variogramme sur le bloc (γ_{vv}). Ainsi on peut comparer deux méthodes en connaissant la fonction d'auto-corrélation et la géométrie des estimants-estimés.



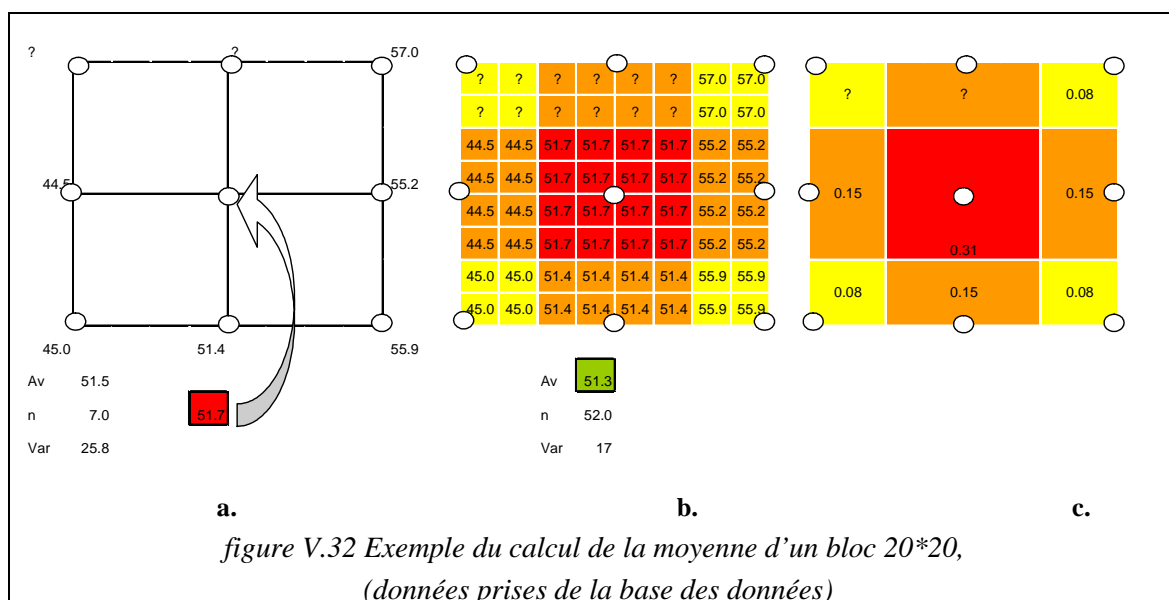
Dans cette partie, on essaie de comparer le krigeage avec la méthode du plus proche voisin. On sait maintenant que le fait de donner la valeur de l'échantillon à un volume comme un bloc doit être accompagné par une variance de l'erreur, qu'on a appelé « la variance d'extension ». En utilisant la moyenne de n échantillons dans le volume comme sa valeur, on divise la variance d'extension par n . Mais dans le cas actuel on aura au maximum un échantillon dans chaque bloc, et la variance de cette méthode sera égale à la variance dans chaque bloc qui est la moyenne du variogramme entre tous les points de bloc (γ_{vv}).

On cherche un estimateur idéal, dans lequel la valeur estimée de chaque bloc soit égale à sa vraie valeur, mais on n'aura de valeur vraie de bloc qu'après l'exploitation du bloc (et son analyse). Dans cette étude, on utilise une approximation de la valeur vraie de bloc.

L'idée de cet exercice est d'estimer la valeur par les données situées sur une maille de 20*20 et les comparer avec une moyenne pondérée des données de maille de 10*10. La figure V.31 explique la manière de calculer la valeur prise comme valeur vraie de bloc. Ensuite, chaque bloc sera estimé par la méthode PPV, grâce au point central du bloc.



La figure V.32 illustre le calcul de la moyenne de bloc par les données extraites de la base des sondages



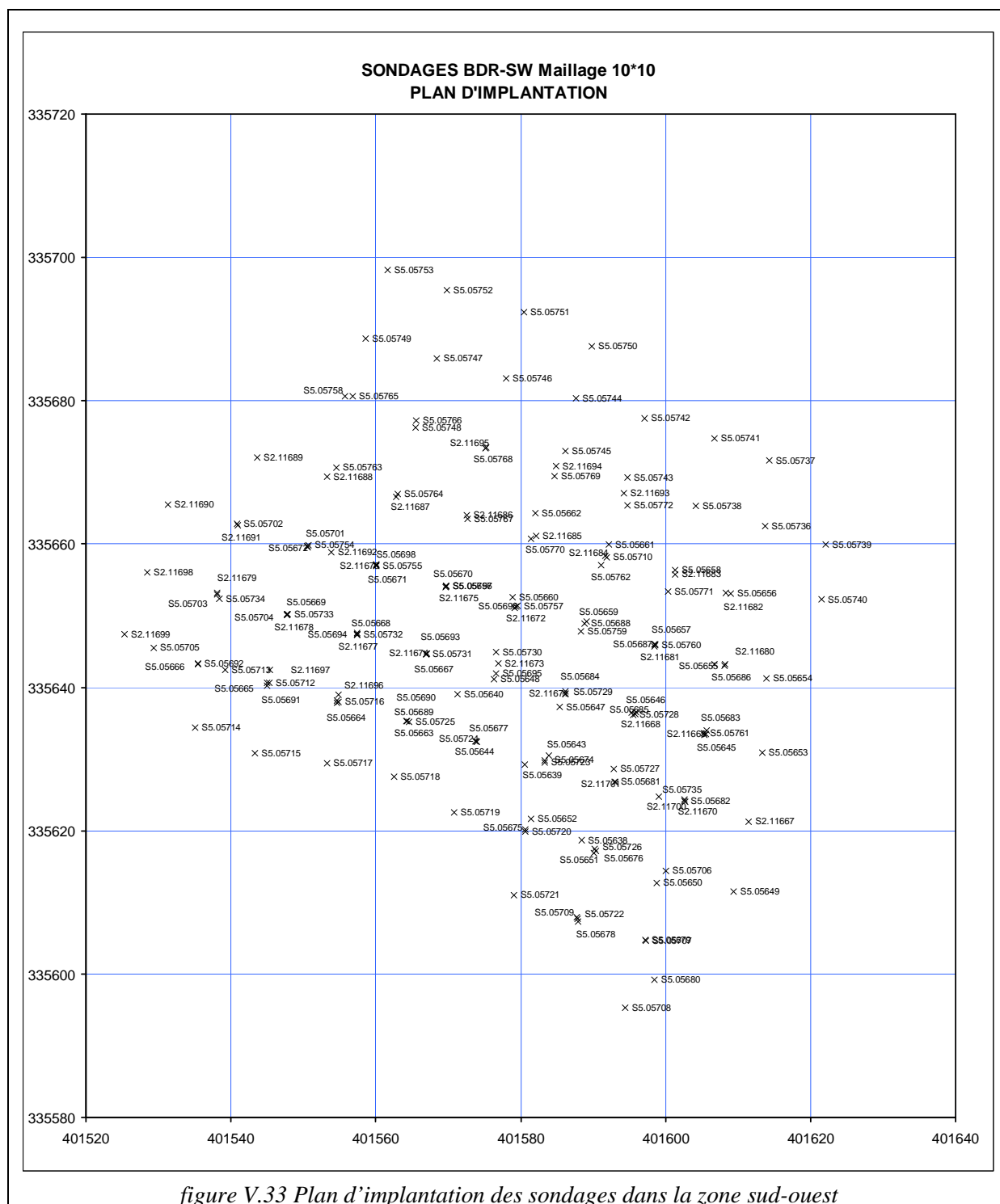
Pour mieux connaître la zone du sud-ouest du gisement BDR, une série de sondages sur une maille de 10m a été faite en 3 à 4 étapes successives (3m pour chaque étape). Le plan d'implantation des sondages est présenté dans la figure V.33. Les sondages de chaque étape ne sont pas exactement calés sur l'endroit des sondages de l'étape précédente et ont été enregistrés individuellement avec leur propre nom de sondage. Ce décalage entre les carottes échantillonnées aux différentes étapes cause certaines lacunes verticales. Par ailleurs, les niveaux communs sont doublement échantillonnés. Cette irrégularité rend plus difficile le traitement numérique des données, une maille régulière virtuelle a été calée sur ces sondages et les échantillons ont été repositionnés par rapport à cette maille régulière.

Du fait des problèmes d'échantillonnage déjà mentionnés, et compte tenu du temps limité par des impératifs de thèse, on va travailler sur les segments d'une longueur d'un demi-mètre. La régularisation automatique des échantillons, et la gestion des lacunes seront très compliquées.

V.3.3.1. Variogrammes expérimentaux

L'étude de la variographie sur les segments montre une légère anisotropie géométrique dans différentes directions horizontales. Le rapport d'anisotropie le plus important est entre les directions N62 et N152. La figure V.34 montre les variogrammes horizontaux anisotropes dans les directions N17 et

N107, sur lesquelles sont callées les mailles carrées de sondage, et dans les directions N62 et N152, correspondant aux diagonales de ces mêmes mailles.

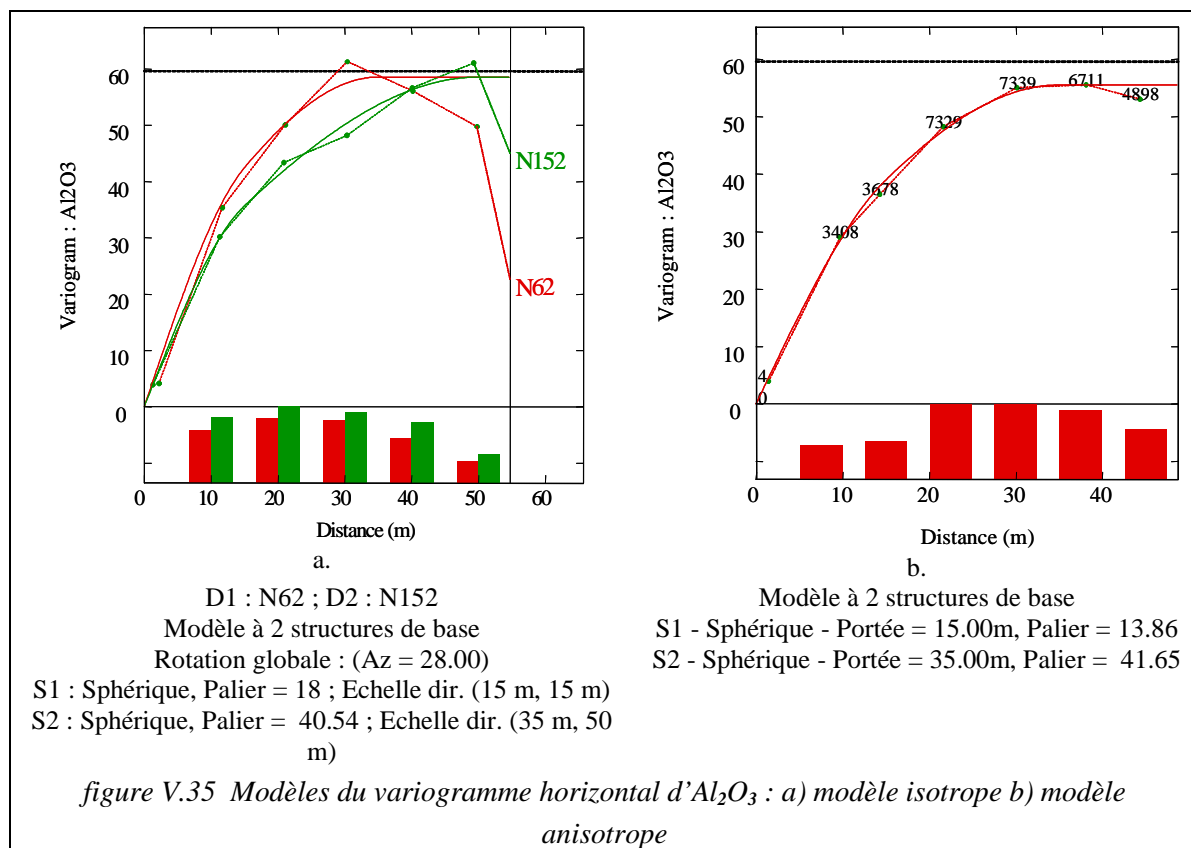
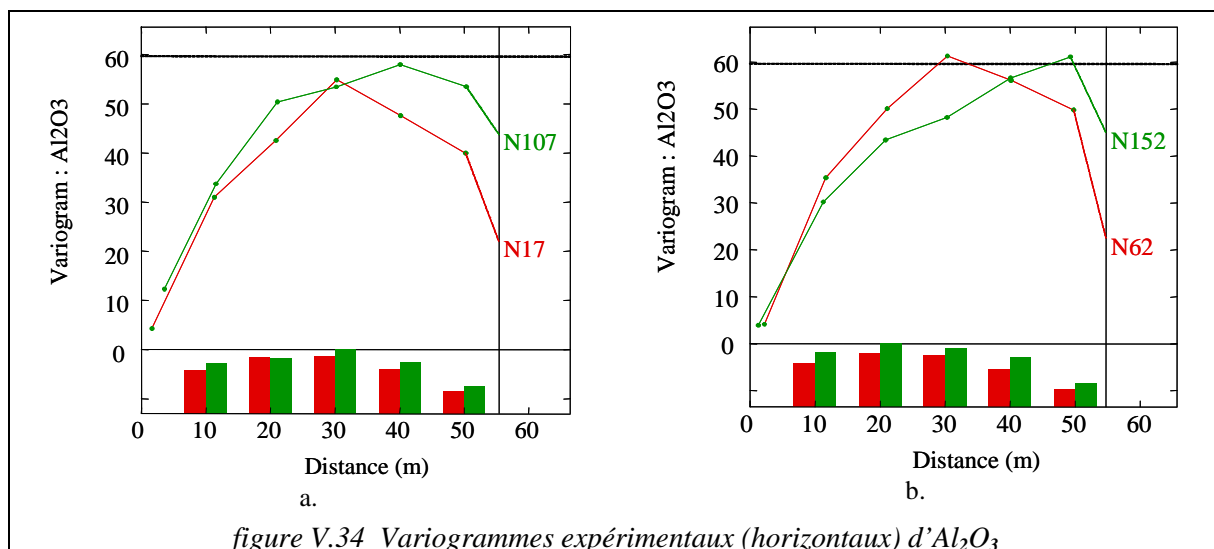


V.3.3.2. Modèle du variogramme en 2D

Parfois on préfère utiliser le modèle 2D du variogramme, cela peut être utile quand on veut éviter de considérer les données proches mais dans la direction verticale, pour respecter les structures géologiques (couches horizontales).

On présente dans la figure V.35, un modèle isotrope et un modèle anisotrope. Pour le calcul du variogramme isotrope toutes les données qui se trouvent dans la même cote ont été utilisés

(tolérance verticale : 0.25m), mais pour le variogramme anisotrope, un balayage de l'espace est utilisé (tolérance angulaire : 45° et distance maximum à l'axe égale à 20m).



On peut résumer la composition des variogramme par les équations suivantes :

Modèle isotrope

$$\gamma(h) = 13.86 * \text{Sph.}(15) + 41.65 * \text{Sph.}(35)$$

Modèle anisotrope

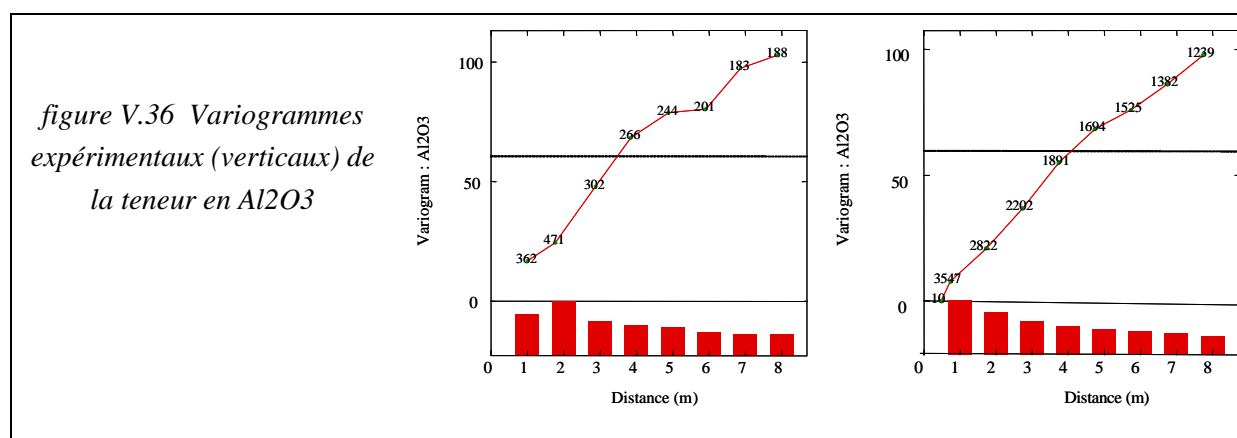
$$\gamma(h) = 18 * \text{Sph.}(15, 15) + 40.54 * \text{Sph.}(35, 50)$$

Les variations à faible distance, inférieure à 15m, représentent presque un tiers de la variation totale. La portée la plus grande est d'environ 35m. On n'a pas d'effet de pépité, ce qui témoigne d'un changement apparemment graduel de la teneur.

V.3.3.3. Variogramme vertical

La figure V.36 compare le variogramme vertical calculé avec les données brutes (a) et le variogramme qu'on a calculé avec les données des segments, on constate le remplacement de la forme de la courbe du variogramme des données brutes, par une forme plus lisse (quasiment linéaire). On a déjà averti le lecteur de cet effet du lissage sur la variance des données. Cet effet sera accentué sur les valeurs du variogramme aux distances plus petites que la longueur réelle des carottes.

On remarque une anisotropie de structure en observant les variogrammes horizontaux, bornés à une valeur inférieure à la variance totale, et la forme du variogramme vertical (figure V.36). Ce variogramme n'est pas un variogramme stationnaire, mais on reste dans le cas de la stationnarité d'ordre 2. La non-stationnarité de la moyenne sur le variogramme vertical révèle des structures spatiales non-bornées (l'existence d'une portée très grande peut également produire une telle tendance).



V.3.3.4. Modèle du variogramme en 3D

On peut résumer la formule du modèle de variogramme gigogne par l'équation suivante :

$$\gamma(h) = 13 * \text{Sph.}(15, 15, 5) + 41 * \text{Sph.}(30, 55, 10) + 20 * \text{Lin.}(200, 200, 3)$$

Les chiffres dans les parenthèses, sont les portées du variogramme dans la direction N152, N62 et dans la direction verticale. Un modèle linéaire a été introduit pour modéliser l'isotropie zonale (dans ce cas, le « palier » est simplement le valeur du variogramme lorsque la distance est égale à la « portée »).

La portée de 10m pour le deuxième variogramme sphérique montre une structure spatiale très intéressante, qui peut être en relation avec les chenaux très profonds dans cette zone du gisement.

Le modèle de variogramme isotrope horizontalement peut être décrit par l'équation suivante :

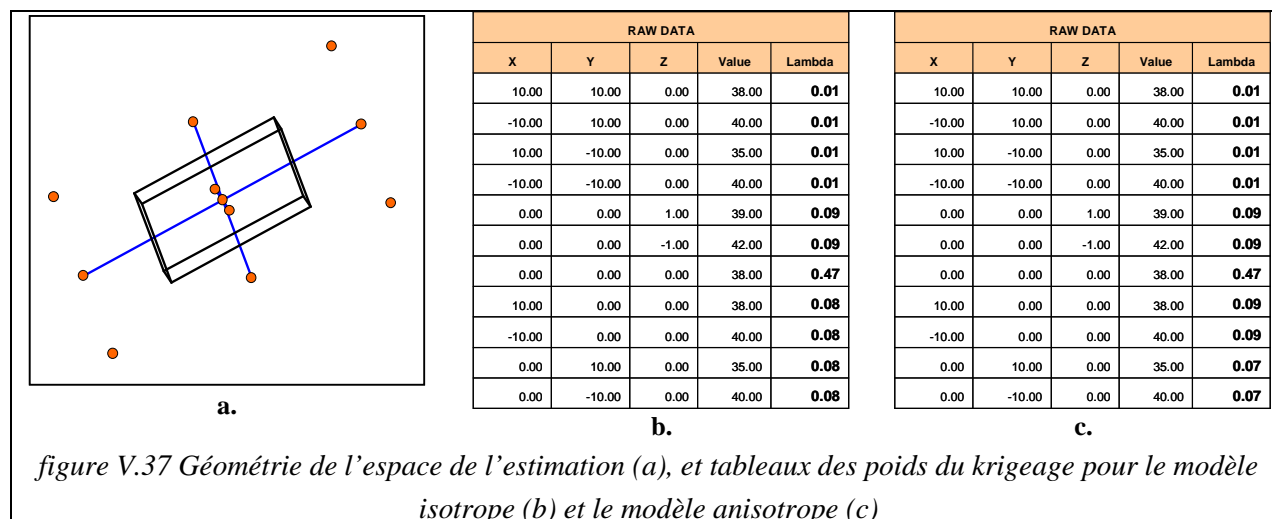
$$\gamma(h) = 13 * \text{Sph.}(15, 5) + 41 * \text{Sph.}(35, 10) + 20 * \text{Lin.}(200, 3)$$

où les nombres entre parenthèses donnent la portée horizontale et la portée verticale.

V.3.3.5. Exemple de poids du krigeage pour le modèle en 3D

A titre d'exemple, on a choisi l'estimation d'un bloc de 10m*10m*0.5m à partir de 11 échantillons ponctuels : 8 échantillons au centre des voisins de même dimension sur le même niveau, l'échantillon central et deux échantillons à une distance verticale d'un mètre du centre du bloc estimé.

La figure V.37 montre la géométrie de l'espace d'estimation, et les tableaux des poids de krigeage, le point central porte 47% du poids total, chacun des deux voisins verticaux est affecté d'une portion d'un peu plus de 9% (valeurs arrondies), chacun des quatre points sur les axes presque 8% tandis que les 4 points les plus éloignés du bloc estimé représentent ensemble seulement 4% de l'estimation. Le rapport d'anisotropie n'est pas très fort aux faibles distances. C'est pourquoi, les poids des points situés à une distance de 10m du centre de bloc ne sont pas sensiblement différents.



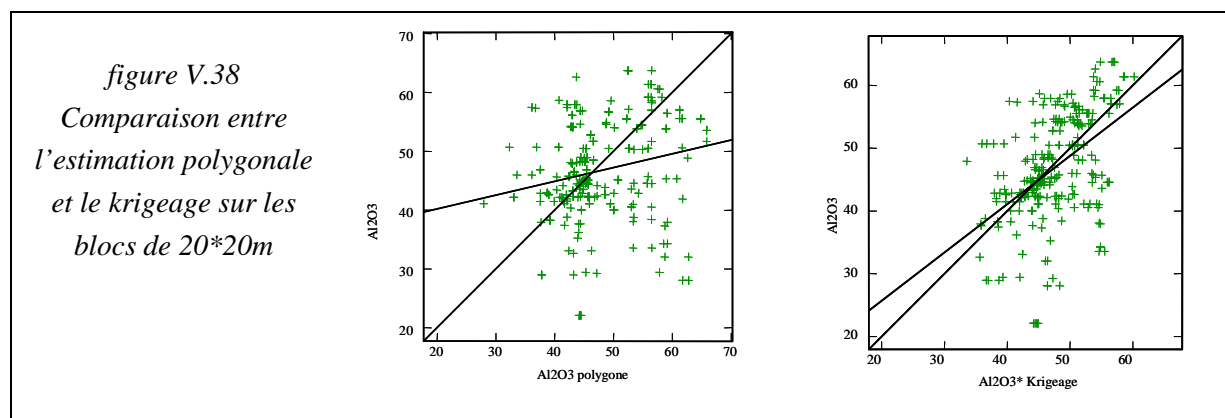
On aperçoit que les deux points voisins sur l'axe z, ont presque la même importance que les points sur les sondages voisins. L'écart-type de l'erreur d'estimation du modèle anisotrope (la racine carrée de la variance de krigage) est légèrement plus faible que celui du modèle isotrope (0.95 et 0.97).

La valeur moyenne est 51.3%. La teneur d' Al_2O_3 du point central est égale à 51.7%, la valeur estimée du même bloc par le krigage sera égale à 51.41%. La variance d'extension est 28.54 et la variance de l'erreur d'estimation est de 4.41 ($\%^2$).

On réalise une estimation plus généralement de la façon suivante :

Pour le krigage on utilise les données sur une maille de 20*20, situées aux sommets des blocs. Seules les données situées sur les nœuds d'une maille de 20*20 qui constituent les limites des blocs seront utilisées dans l'estimation par krigage. La méthode PPV aura l'avantage de la participation dans le calcul de la valeur vraie (25%), en revanche on impose au minimum 4 points au voisinage pour l'estimation par krigage (aucune de ces données n'a été utilisée pour le calcul de la vraie valeur des blocs).

Le résultat de cette estimation est présenté dans la figure V.38. La bissecteur présente l'estimateur idéal dans lequel l'estimé est égal à la vraie valeur. La ligne de régression pour chaque cas a été tracée. On constate que la pente de la ligne de tendance pour le cas d'extension de l'échantillon du sondage central est très faible et très loin d'être égale à 1. En revanche malgré la dispersion des points, la ligne de tendance pour le cas de krigage est très proche de la ligne du bissecteur représentant l'estimateur idéal. Le coefficient de corrélation entre la teneur d'échantillon situé à l'intérieur du bloc et la valeur supposée comme la moyenne du bloc est très faible et d'environ 0.24. Ce coefficient dans le cas du krigage n'est pas très fort, mais en comparaison avec la méthode précédente, on constate une amélioration très importante, le coefficient de corrélation est d'environ 0.47.



V.4. Gisement Bois des Rentes (BDR)

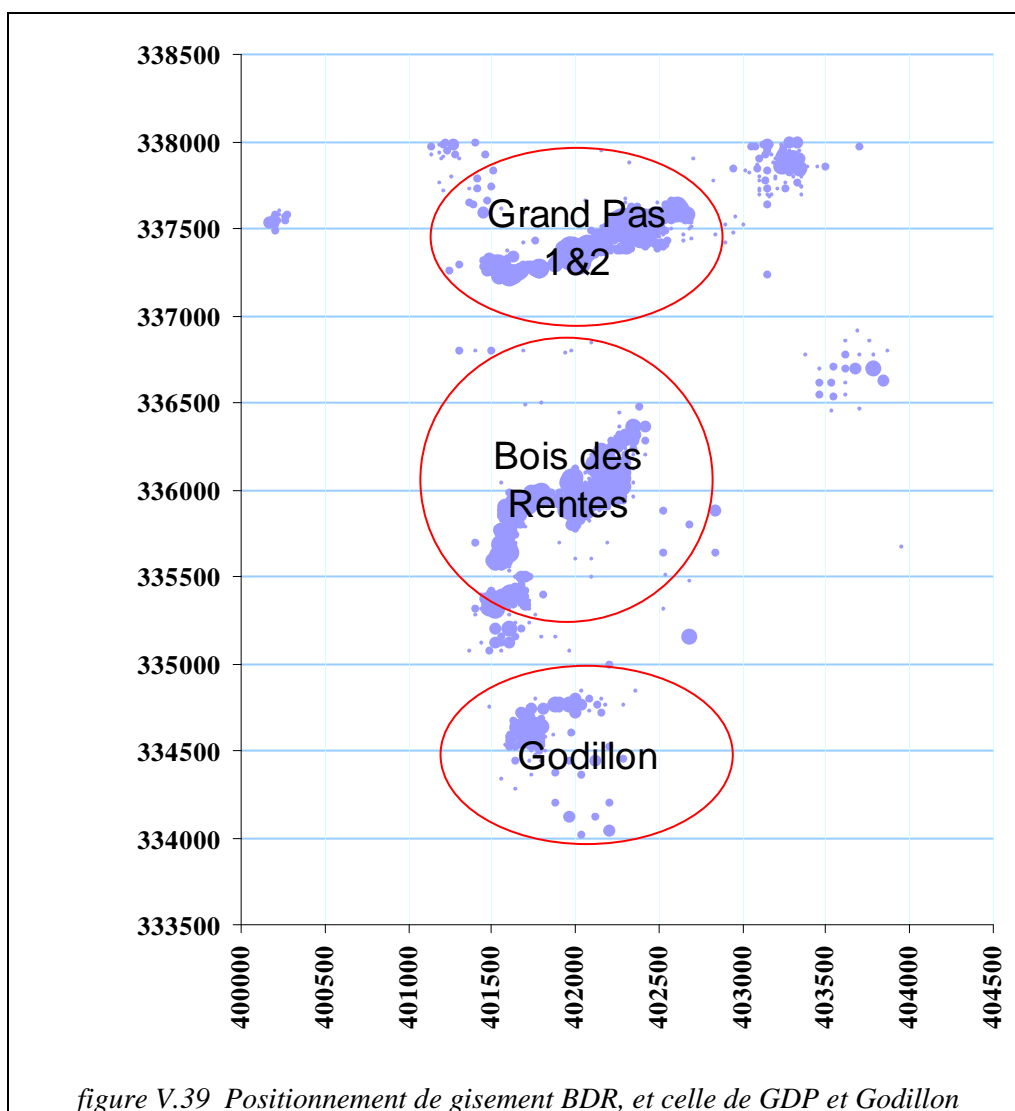
Une grande partie des études a été concentrée sur le gisement de Bois des Rentes, ce gisement est un des plus grands gisements en exploitation d'AGS. Le gisement de BDR est particulièrement riche en argile hyperalumineuse.

V.4.1. Présentation du gisement

V.4.1.1. Localisation géographique

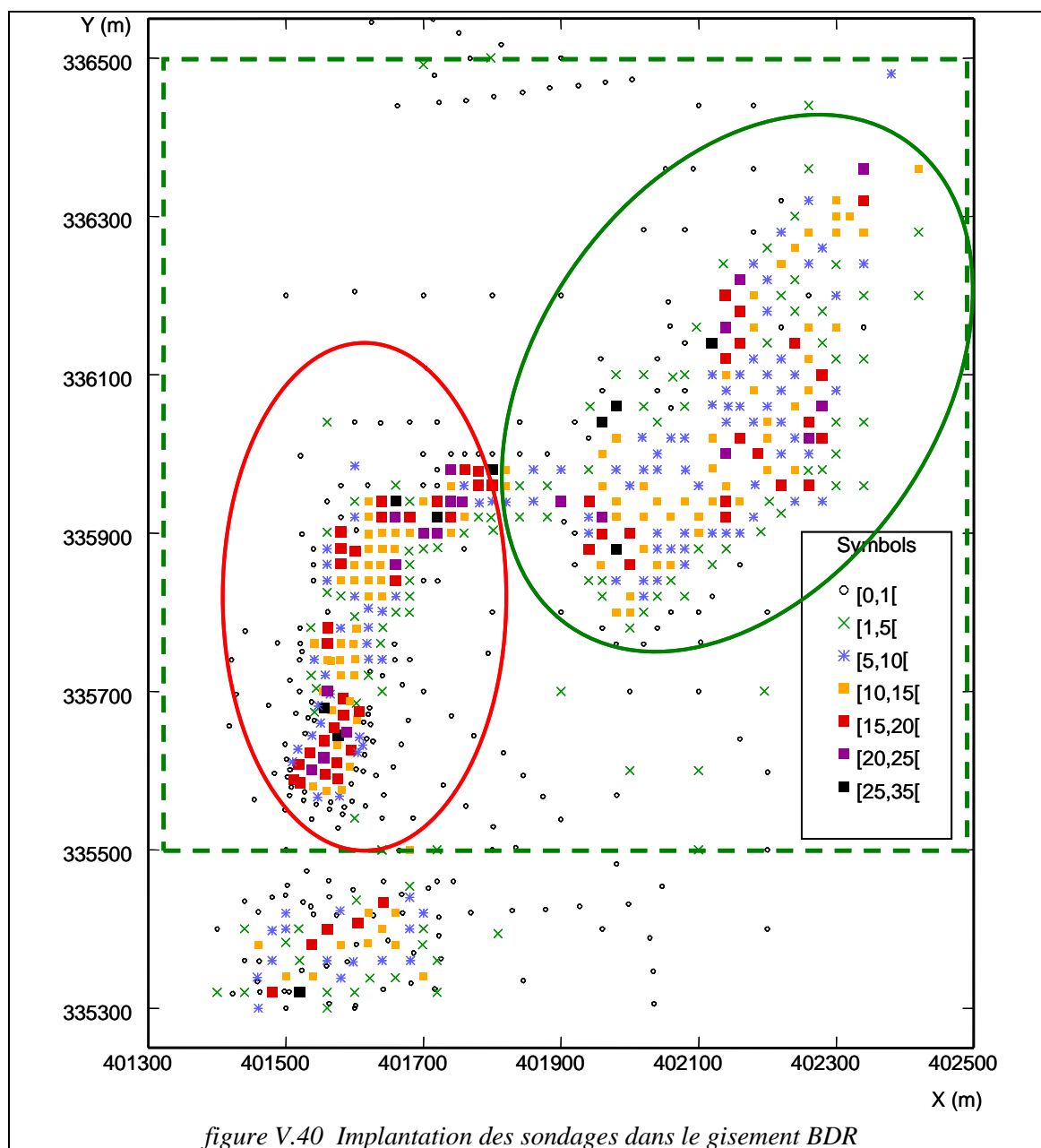
Le gisement kaolinique Bois des Rentes (on l'appelle BDR) est situé dans le bassin sédimentaire des Charentes. Ce gisement n'est pas très loin de l'usine de traitement de Clérac (déchiquetage, mélange, production de chamotte) et de l'usine d'Orillon.

Ce gisement se trouve au sud de deux grandes carrières en extraction d'AGS nommées Grand Pas 1 et Grand Pas 2 (GDP1, GDP2) et au nord de l'ancienne carrière de Godillon (figure V.39).



V.4.1.2. Sondages de BDR

La forme géométrique du gisement de BDR a été imposée par l'architecture de la sédimentation du flux, avec des petits méandres. Pour cette étude on a choisi un cadre pour définir l'espace de travail. Dans ce cadre, on dénombre plus de 500 sondages : la maille de sondage est plus régulière dans la partie Nord-est du gisement (distance de 40m), tandis que dans secteur Sud-ouest, à cause de la forme chenalisée du gisement, la maille est plus serrée et moins régulière (la distance entre les sondages varie entre 15 et 20 m)

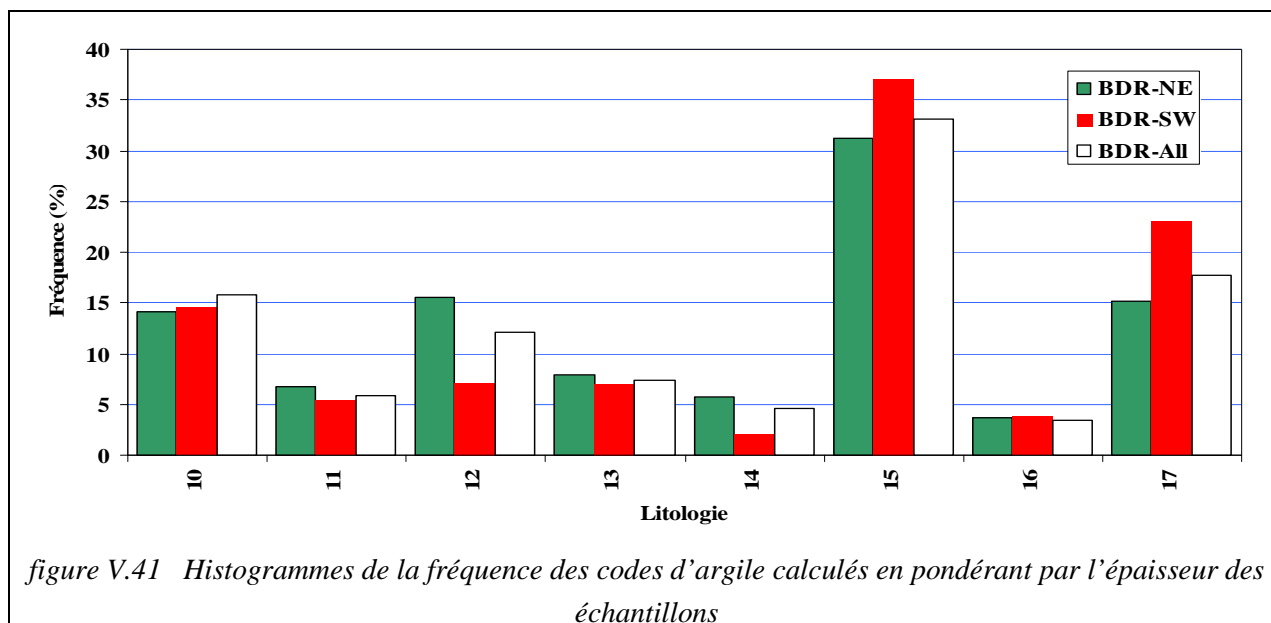


Dans la figure V.40, la somme de l'épaisseur totale de l'argile classée comme argile par AGS dans chaque sondage a été représenté par un symbole. Le cadre montre la zone de travail.

Certains sondages sont assez profonds pour toucher le socle calcaire massif, d'autres sondages ont été arrêtés dans le sable. Il y a des cas très rares où le sondage n'est pas assez profond.

V.4.1.3. Description des unités lithologiques

Les faciès lithologiques sont présentés d'une manière descriptive dans le deuxième chapitre. La figure V.41 représente l'histogramme de la fréquence des différentes argiles kaoliniques dans le gisement BDR. On peut comparer leur fréquence dans la partie Sud-Ouest du gisement avec celle du Nord-Est du gisement. La fréquence des argiles de code 15 et 17 (argiles grasses et pierreuses) est sensiblement plus importante dans la partie Sud-Ouest du gisement, tandis que pour l'argile demi grasse à grain (de code 12), le gisement BDR-NE se révèle plus riche.



V.4.1.4. Analyse statistique des données

Pour avoir une vision statistique des variables, on présente ici, brièvement, certains de leurs paramètres statistiques. On peut comparer les histogrammes d' Al_2O_3 et de PF (Perte au Feu) dans la totalité du gisement avec les deux sous domaines au Nord-Est et au Sud-Ouest du gisement, dans la figure V.42 (remarque : l'échelle de l'axe vertical des histogrammes n'est pas identique). Le Tableau V.9 résume les paramètres statistiques des variables les plus importantes.

On constate que les échantillons riches en Al_2O_3 et en PF sont plus fréquents dans le Sud-Ouest de BDR. Cela confirme la tendance de la formation des argiles hyperalumineuses dans les parties chenalisées du gisement. Les histogrammes des deux variables sont très asymétriques. L'écart important entre les valeurs des échantillons très riches et celles des échantillons pauvres, aura un rôle décisif sur la forme du variogramme. Les données apparaissent plus dispersées dans le cas de la partie Sud-Ouest du gisement, et leur distribution présente un écart type plus important que celle des valeurs de la partie Nord-Est.

La forme bimodale est visible surtout pour l'histogramme de l'alumine calcinée de la partie Sud-Ouest du gisement. L'étude détaillée de la zone septentrionale de cette partie, qui a été récemment échantillonnée sur une maille de 10*10 m, montre la présence probable de trois populations statistiques différentes. On a essayé de l'ajuster par trois distributions gaussiennes, la méthode des moindres carrés de la fréquence des classes a été utilisée comme critère d'ajustement.

Tableau V.9 Paramètres statistiques des éléments chimiques les plus importants

Domaine	Variable	N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.
Sud-ouest	PF	1915	6 .10	61 .40	15.76	5.2
	Al ₂ O ₃	1915	23.38	76.48	44.56	7.18
	TiO ₂	1915	0.44	4.52	1.26	0.37
	Fe ₂ O ₃	1915	0.01	12.32	1.22	0.72
	K ₂ O	1817	0.01	2.04	0.55	0.5
	Epaisseur	1915	0.5	8.5	1.65	1.06
Nord-est	PF	1865	7.75	43.83	13.98	2.87
	Al ₂ O ₃	1865	24.20	66.90	42.77	5.37
	TiO ₂	1865	0.68	5.30	1.38	0.43
	Fe ₂ O ₃	1865	0.29	13.32	1.34	0.79
	K ₂ O	1865	0.01	2.44	0.63	0.49
	Epaisseur	1865	0.5	3.0	1.26	0.52
Total	PF	3793	6.10	61 .40	15.00	4.55
	Al ₂ O ₃	3789	23.38	76.48	43.75	6.50
	TiO ₂	3790	0.44	5.3	1.31	0.40
	Fe ₂ O ₃	3790	0.01	13.32	1.28	0.76
	K ₂ O	3692	0 .01	2.44	0.59	0.50

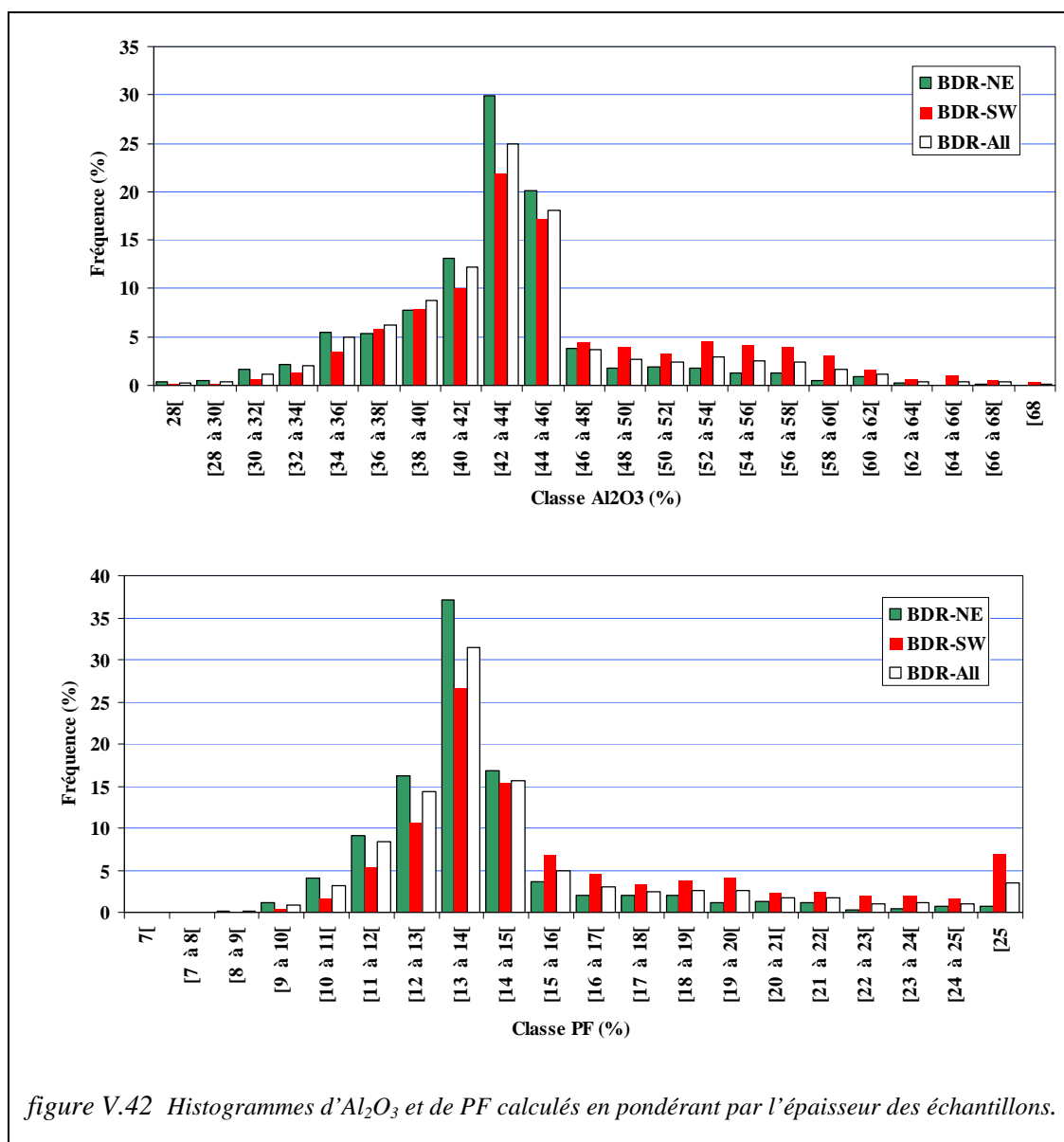


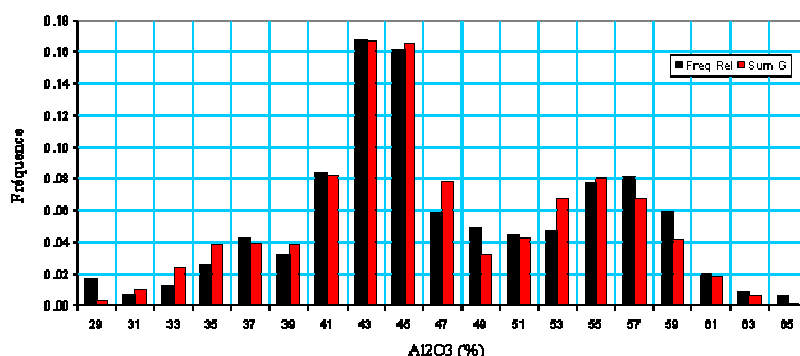
figure V.42 Histogrammes d' Al_2O_3 et de PF calculés en pondérant par l'épaisseur des échantillons.

La figure V.43 compare l'histogramme des données (pondérées par leurs épaisseurs) avec l'histogramme du modèle, on présente ici le modèle en termes mathématiques comme la combinaison linéaire suivante :

$X_i = 0.15 * G_1(36, 3.0) + 0.50 * G_2(44, 2.2) + 0.35 * G_3(55, 3.5)$, où G_1, G_2 et G_3 sont trois lois de gauss et le premier chiffre dans la parenthèse présente la moyenne et le deuxième est l'écart type.

En général ce genre de distribution indique la présence de phénomènes différents qui peuvent être très distincts dans l'espace. On aura des zones riches et des zones pauvres très bien séparées dans l'espace (dans le gisement), mais cela ne signifie pas toujours que l'on saura différencier ces zones dans le gisement.

figure V.43 Ajustement par trois distributions gaussiennes de l'histogramme d' Al_2O_3



Comme on a vu dans le chapitre précédent, les argiles riches en alumine sont très pauvres en oxyde de fer et de potassium. La comparaison entre les histogrammes de l'oxyde de fer (figure V.44) et la potasse mesurée sur les échantillons confirme cette hypothèse. Cette tendance de corrélation inverse de teneurs entre la teneur en argile, et la teneur en potasse, est plus nette pour le cas de la potasse. (figure V.45).

La différence des histogrammes de TiO_2 dans les deux sous domaines n'est pas significative. La figure V.46 présente le nuage de dispersion de la teneur en alumine brute en fonction de la teneur en alumine calcinée (mesurée par la fluorescence de rayon X), dans le gisement de BDR. En premier lieu, on constate que la relation entre ces deux variables n'est pas linéaire. La valeur d'alumine brute est calculée en utilisant la PF et la teneur en Al_2O_3 . Dans ce qui suit, pour éviter des confusions, on note les variables en état calciné présentées sous la forme « variable-C » ou le nom de variable tout court, et les variable brutes sont toujours présentées sous la forme « variable-B ».

On revient sur ce sujet, ci-après, dans le paragraphe concernant les problèmes d'estimation.

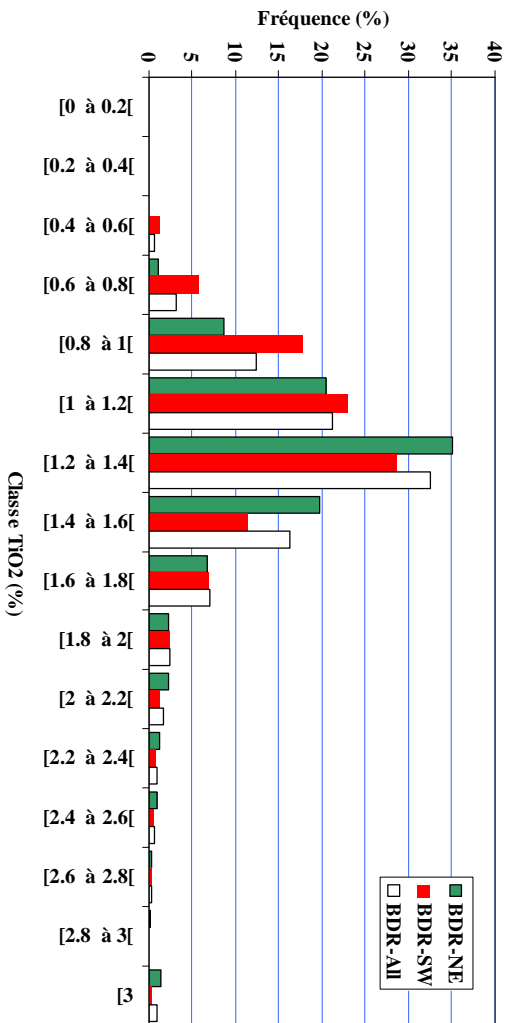
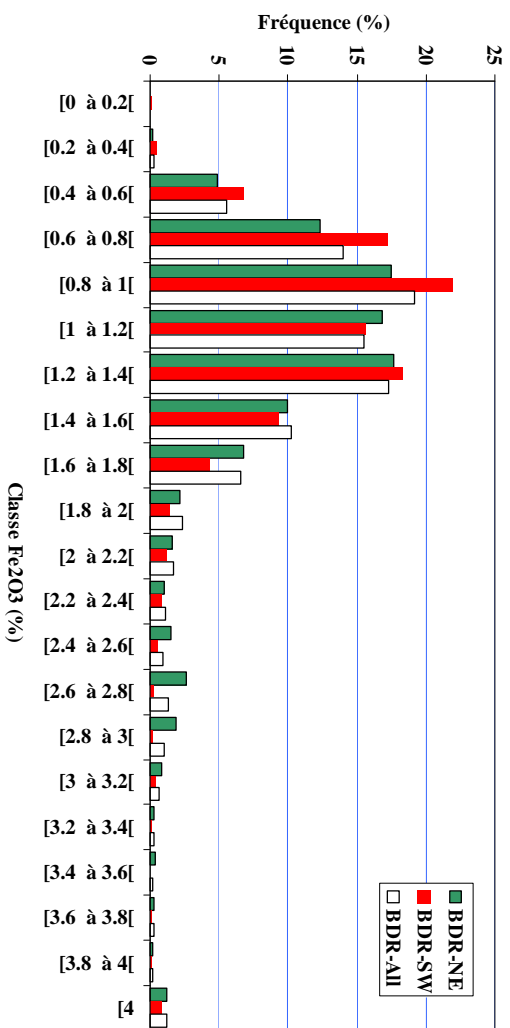


figure V.44 Histogrammes de Fe_2O_3 et de TiO_2 calculés en pondérant par l'épaisseur des échantillons

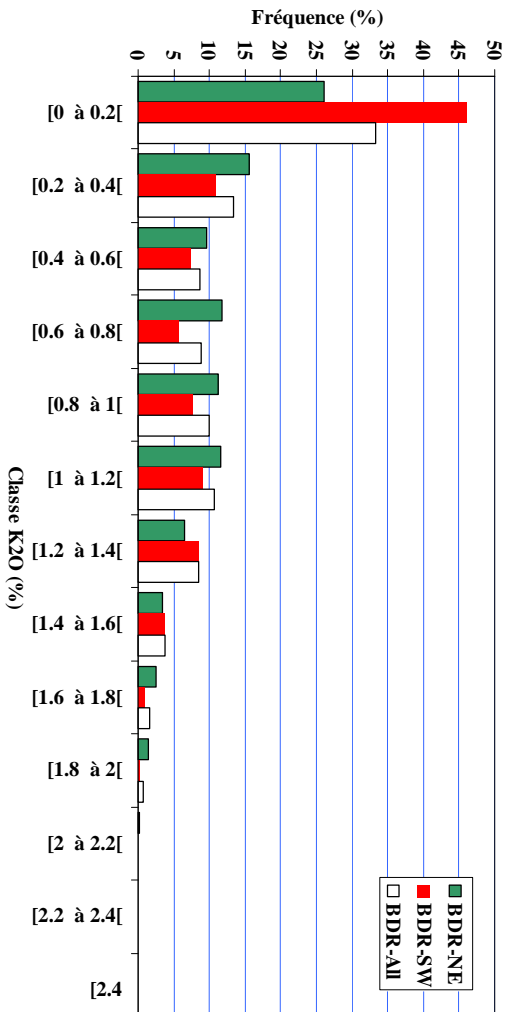


figure V.45 Histogrammes de K_2O calculés en pondérant par l'épaisseur des échantillons.

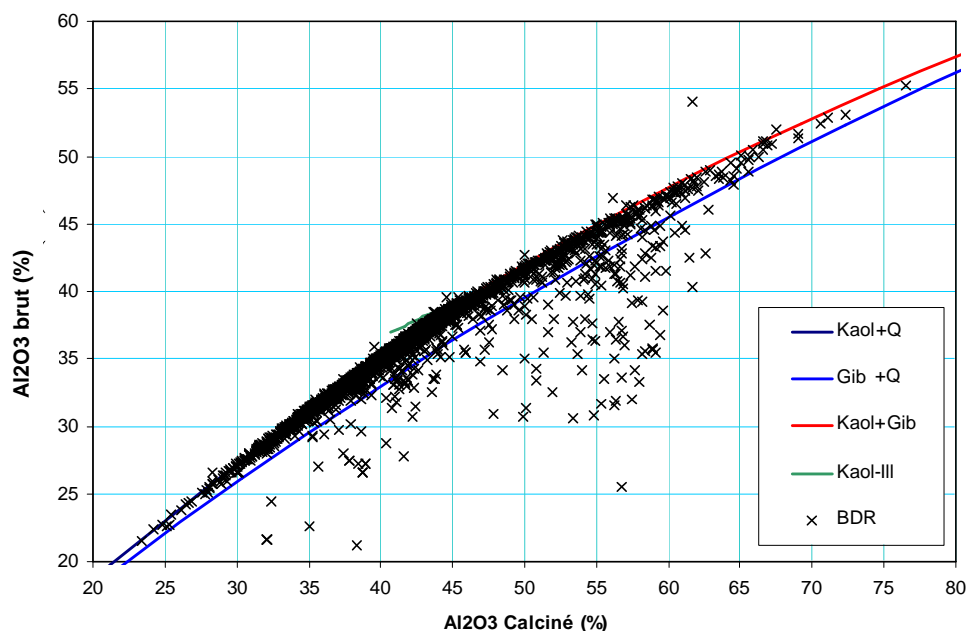


figure V.46 Relation non linéaire entre la teneur en Al_2O_3 et Al_2O_3 -calciné pour différentes compositions chimiques et les données du gisement BDR.

La figure V.47 montre la relation entre le contenu de la PF des échantillons en fonction de leur teneur mesurée en alumine (alumine calcinée). Les différentes compositions minéralogiques théoriques sont présentées. On constate un nuage de points autour de la ligne caractérisant une composition du kaolin-quartz. En remplaçant 10% de kaolin par 10% d'illite, on aura une composition avec une valeur plus faible de la perte au feu en comparaison avec la composition kaolinite-quartz de même contenu en alumine.

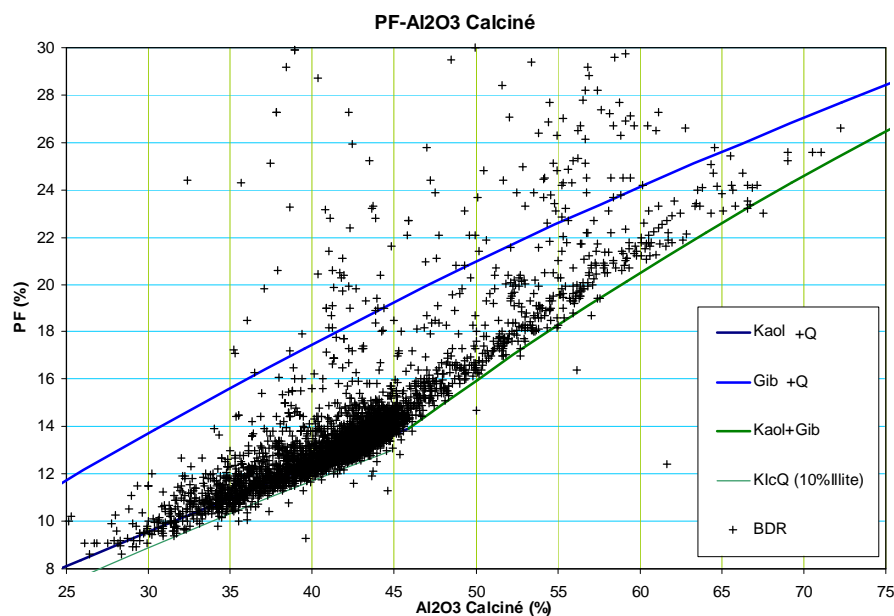


figure V.47 Relation non linéaire entre la PF et la teneur en Al_2O_3 calcinée pour différentes compositions chimiques et les données du gisement BDR.

Cela peut être utilisé pour expliquer la présence des points au dessous de la ligne de composition kaolin-quartz. La présence des matières organiques explique en partie, l'écart de la PF des points situés au dessus de la ligne avec la composition théorique.

Dès 45-46% d'alumine (la valeur stœchiométrique de la kaolinite) la pente change et le rapport de PF à Al_2O_3 augmente. Les points qui se situent au dessous de la ligne présentant la composition kaolinite-gibbsite sont très rares. Pour les trois points les plus écartés de la ligne, on suppose qu'il existe une erreur d'analyse ou de saisie des données.

La majorité des points restent au dessus de la ligne. Cela est expliqué, dans plus part des cas, par la présence de traces organiques dans les échantillons.

V.4.2. Estimation de la puissance et des accumulations

Un cas particulier de régularisation est la montée de la Variable Régionalisée. La montée (d'ordre 1) d'une Variable Régionalisée, dans une direction, consiste à prendre l'intégrale de cette Variable Régionalisée le long de cette direction. On définit de la sorte une nouvelle Variable Régionalisée, dans un espace possédant une dimension de moins. Incidemment, remarquons que cette opération n'a rien ni de mystérieux, ni d'exceptionnel : elle correspond en particulier à l'opération, courante en estimation minière, de calcul d'accumulation.

V.4.2.1. Introduction

L'accumulation le long d'un forage vertical est le produit de l'épaisseur de minerai par la moyenne de la teneur du minerai dans le forage, elle représente une quantité de métal par unité de surface (Chilès et Delfiner, 1999).

Dans le domaine minier, pour obtenir des estimations, on utilise l'accumulation des teneurs. Cette méthode permet de se ramener à une étude dans un espace 2D et de réduire considérablement le calcul numérique.

Plusieurs problèmes 3D peuvent être simplifiés en des problèmes 2D. C'est le cas notamment de gisements se présentant sous la forme de veines minces. Habituellement on travaille alors avec l'accumulation de métal (produit épaisseur x teneur) et l'épaisseur de la veine qui sont 2 variables additives (alors que la teneur ne l'est pas dans ce cas). On obtient la teneur estimée par division de l'accumulation estimée par l'épaisseur estimée. Certains praticiens préfèrent toutefois travailler avec la teneur directement même si celle-ci n'est pas additive. Par additif, on entend que la valeur de la variable sur une zone est donnée par la moyenne des valeurs des sondages de la zone. Si l'épaisseur d'une veine varie alors la teneur pour une portion du gisement n'est plus égale à la teneur moyenne des sondages correspondants mais plutôt à une moyenne pondérée par les épaisseurs (Marcotte, Cours en ligne).

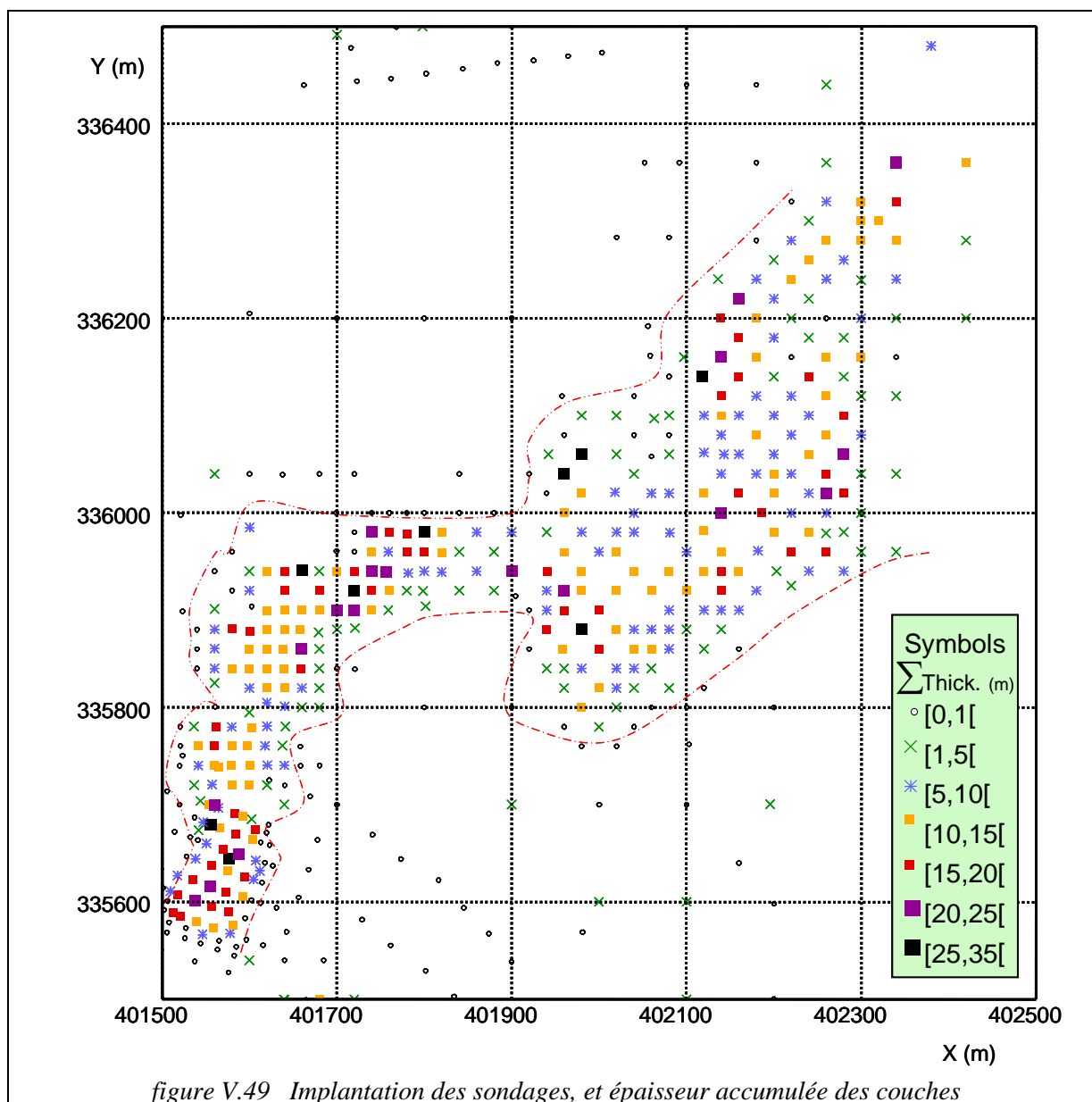
Dans certains cas, l'utilisation de la variable accumulation semble préférable, à celle de la variable teneur. Par exemple dans le cas de minéralisations en veines minces, le corps minéralisé est bien défini et la variation verticale de la teneur n'est pas très importante pendant l'exploitation. Normalement le stérile est très pauvre en métal, l'accumulation sera plus stable que la teneur moyenne, parce que pour les volumes ayant une hauteur plus grande que l'épaisseur de la veine, l'accumulation reste constante.

L'accumulation peut être utilisée comme la variable de la quantité de métal. Cette signification est une autre raison de l'utilisation de l'accumulation. Par contre, si on ne connaît pas le volume ou la puissance de la couche, l'accumulation ne peut pas être associée simplement à un critère économique.

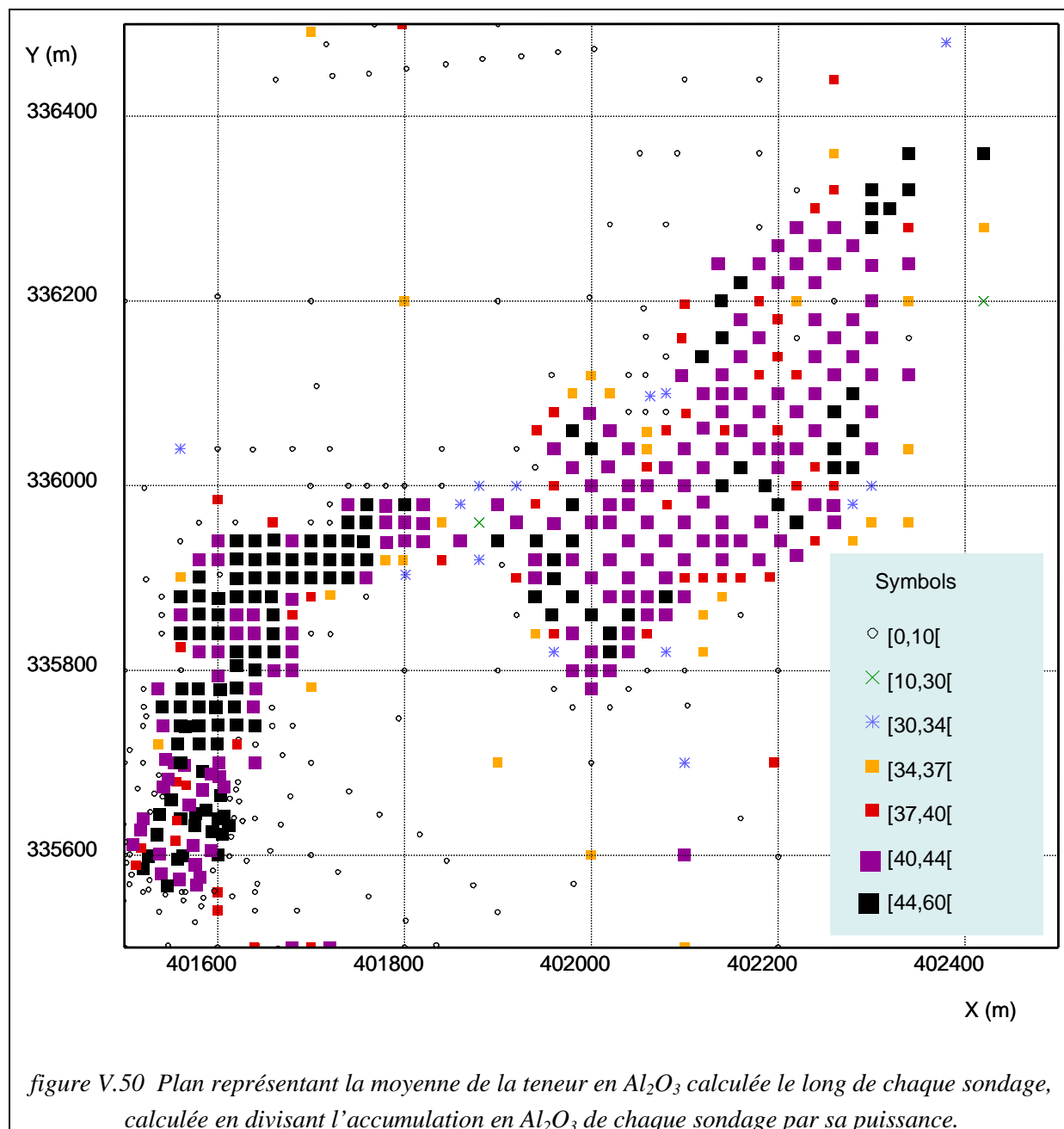
Dans le cas où on recoupe seulement une partie de la zone minéralisée, le poids de métal obtenu sera lié à la taille de l'unité exploitée, à son positionnement par rapport au corps minéralisé et à la distribution spatiale du métal. Par ailleurs, si le stérile n'est pas exempt de minerai on aura aussi une relation entre l'accumulation et les paramètres volumiques et géométriques.

Par contre la teneur est généralement associée à un élément de volume, c'est pour cela que les teneurs sont exprimées en % du poids de l'échantillon. Dans l'estimation géostatistique, on utilise des teneurs mesurées ou calculées sur une taille fixe : appelé support d'estimation.

Latéralement, on peut distinguer certains passages brutaux marqués par des sondages ayant une puissance d'argile supérieure à 25m entourés de sondages complètement stériles. Ces changements sur une distance de 40m peuvent réduire considérablement la portée du variogramme.

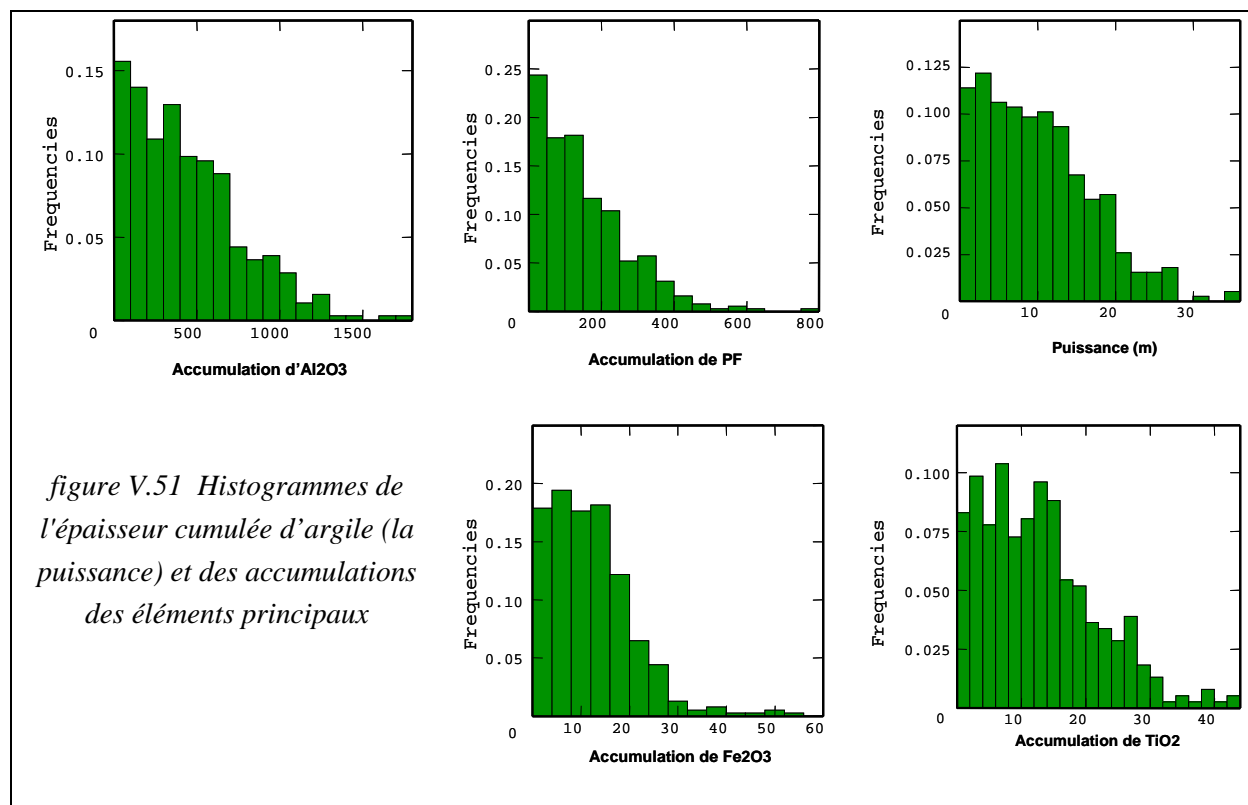


La moyenne de la teneur en Al_2O_3 a été calculée en divisant l'accumulation d' Al_2O_3 de chaque sondage par sa puissance. Les changements brutaux sont visibles sur ce plan. Le gisement BDR est un gisement très riche en argiles hyperalumineuses. Des teneurs moyennes entre 40 et 44% sont très fréquentes dans la partie Nord-Est du gisement, comme on a vu dans le chapitre précédent. La partie Sud-Ouest se présente plus riche en argiles hyperalumineuses, et les sondages ayant une teneur supérieure à 44% d' Al_2O_3 sont assez fréquents.



L'analyse statistique a été faite sur les sondages de puissance non nulle. Les histogrammes des accumulations des éléments principaux, présentés dans la figure V.51, sont un peu différents de celui de la puissance, mais leurs formes générales restent approximativement semblables, sauf pour l'accumulation de l'oxyde de fer. L'histogramme de l'accumulation en Al_2O_3 est le plus semblable à celui de la puissance, une des raisons réside dans la méthode de calcul de l'accumulation.

L'accumulation a été calculée pour les argiles AGS, donc le choix de la taille de carotte a été fait indirectement, sur une catégorie d' Al_2O_3 . Cela peut créer un lien plus fort entre l'accumulation d' Al_2O_3 et la puissance d'argile dans le sondage.



La matrice de corrélation présentée dans le Tableau V.10, confirme la ressemblance mentionnée, Il ne faut pas confondre la corrélation statistique entre les variables avec celle de leurs accumulations. Les valeurs de corrélation les plus basses concernent l'accumulation en oxyde de fer. Ceci s'expliquerait par le fait que la distribution d'oxyde de fer n'est pas très cadrée par le processus de sédimentation, contrairement aux autres éléments chimiques et est localement plus variable.

Tableau V.10 Matrice de corrélation de la puissance d'argile et des accumulations des éléments principaux.

VARIABLE		Accumulation				Puissance
		Al_2O_3	Fe_2O_3	PF	TiO_2	
Accumulation	Al_2O_3	1.00	0.86	0.98	0.94	0.99
	Fe_2O_3	0.86	1.00	0.85	0.88	0.89
	PF	0.98	0.85	1.00	0.91	0.97
	TiO_2	0.94	0.88	0.91	1.00	0.96
Puissance		0.99	0.89	0.97	0.96	1.00

Les paramètres statistiques sont présentés dans le Tableau V.11. Dans ce chapitre on va comparer le résultat d'une estimation faite à l'aide d'un modèle géostatistique ajusté sur la totalité du gisement et celui qui est obtenu à partir d'un modèle propre à chaque sous-domaine. On a déjà mis en évidence la différence entre le sous domaine Nord-Est et celui du Sud-ouest. Le Tableau V.11, le Tableau V.12 et le Tableau V.13 permettent de comparer les paramètres statistiques de ces éléments dans ces deux sous-domaines.

Le sous domaine Sud-ouest se distingue par sa variance plus élevée, produite par la forme chenalisée du gisement et la présence plus importante d'argile à hautes teneurs. Les paramètres statistiques correspondants sont donnés par le Tableau V.14 et par le Tableau V.15.

Tableau V.11 Paramètres statistiques de la puissance d'argile et d'accumulations des éléments principaux du gisement BDR

VARIABLE		N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.	Q25	Q50	Q75
Accumulation	Al ₂ O ₃	386	16.46	1757.56	431.72	324.12	161.88	361.33	625.38
	Fe ₂ O ₃	386	0.59	54.12	12.13	8.60	5.68	11.27	16.38
	PF	386	5.45	776.26	148.25	121.10	52.8	118.00	214.50
	TiO ₂	386	0.50	43.68	12.72	8.82	5.74	11.36	17.94
Puissance		386	0.50	35.50	9.78	6.84	4.00	8.50	14.00

Tableau V.12 Comparaison des Paramètres statistiques de la moyenne d'Al₂O₃ et de PF calculés pour les sondages.

VARIABLE			N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.	Q25	Q50	Q75
Moyenne	Al ₂ O ₃	BDR	386	27.49	58.10	42.24	4.40	39.82	42.44	44.57
		NE	211	27.49	48.43	40.94	3.84	39.32	41.55	43.29
		SW	169	31.66	58.10	44.06	4.36	41.68	43.99	46.94
	PF	BDR	386	8.83	25.91	14.11	2.34	12.79	13.59	14.9
		NE	211	8.83	18.56	13.24	1.45	41.68	43.99	46.94
		SW	169	10.08	25.91	15.26	2.72	12.52	13.17	13.95

Tableau V.13 Comparaison des Paramètres statistiques de la moyenne de Fe₂O₃ et de TiO₂ calculés pour les sondages.

VARIABLE			N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.	Q25	Q50	Q75
Moyenne	Fe ₂ O ₃	BDR	386	0.57	5.70	1.38	0.63	1.02	1.21	1.53
		NE	211	0.68	5.41	1.51	0.67	1.11	1.34	1.65
		SW	169	0.57	3.75	1.17	0.40	0.93	1.07	1.25
	TiO ₂	BDR	386	0.64	4.22	1.34	0.29	1.19	1.3	1.42
		NE	211	1.01	4.22	1.41	0.32	1.25	1.35	1.48
		SW	169	0.64	2.19	1.25	0.21	1.11	1.21	1.35

La moyenne de la puissance de kaolin, dans la zone nord-est, est de 8.77m, et dans la zone sud-ouest, atteint 11.34m. L'écart-type de BDR-SW est supérieur à celui de BDR-NE. Comme on l'a observé, il existe entre la puissance et l'accumulation une relation statistique très forte, donc l'écart-type des accumulations des variables dans BDR-SW est supérieur à celui de la zone du nord-est du gisement.

Tableau V.14 Paramètres statistiques de la puissance d'argile et d'accumulation des éléments principaux sous-domaine Nord-est

VARIABLE		N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.	Q25	Q50	Q75
Accumulation	Al ₂ O ₃	211	16.46	1221.58	375.12	281.41	138.26	318.76	521.01
	Fe ₂ O ₃	211	0.67	40.08	11.75	7.54	5.89	11.48	16.31
	PF	211	5.45	439.80	122.61	95.31	44.05	104.00	168.30
	TiO ₂	211	0.51	43.68	12.08	8.23	4.89	11.16	17.18
Puissance		211	0.50	27.00	8.77	6.13	3.50	8.00	12.50

Tableau V.15 Paramètres statistiques de la puissance d'argile et d'accumulation des éléments principaux.
sous-domaine Sud-ouest

VARIABLE		N°	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.	Q25	Q50	Q75
Accumulation	Al ₂ O ₃	169	21.15	1757.56	516.09	353.06	210.75	476.32	706.12
	Fe ₂ O ₃	169	0.59	54.12	12.92	9.70	5.78	11.44	17.02
	PF	169	6.70	776.26	184.98	139.12	72.60	162.05	272.20
	TiO ₂	169	0.50	43.62	13.92	9.31	6.94	12.78	18.99
Puissance		169	0.50	35.50	11.34	7.32	5.00	11.00	16.00

Les paramètres statistiques ont été calculés sans pondération par le volume, ceci est faisable, en utilisant un facteur de discrétisation.

V.4.2.4. Analyse variographique

L'idée fondamentale de la variographie est très simple et logique. La nature n'est pas entièrement "imprévisible", cela est la clé essentielle. Deux observations situées l'une près de l'autre devraient, en moyenne, se ressembler davantage que deux observations éloignées. Cette notion est connue par les mineurs et les géologues en tant que la notion de "continuité" de la minéralisation. En géostatistique, on cherche à quantifier cette continuité préalablement à tout calcul effectué sur le gisement (Marcotte).

Dans certains cas, l'étude variographique se fait seulement sur les données situées dans la couche minéralisée pour révéler la structure liée directement au processus de minéralisation.

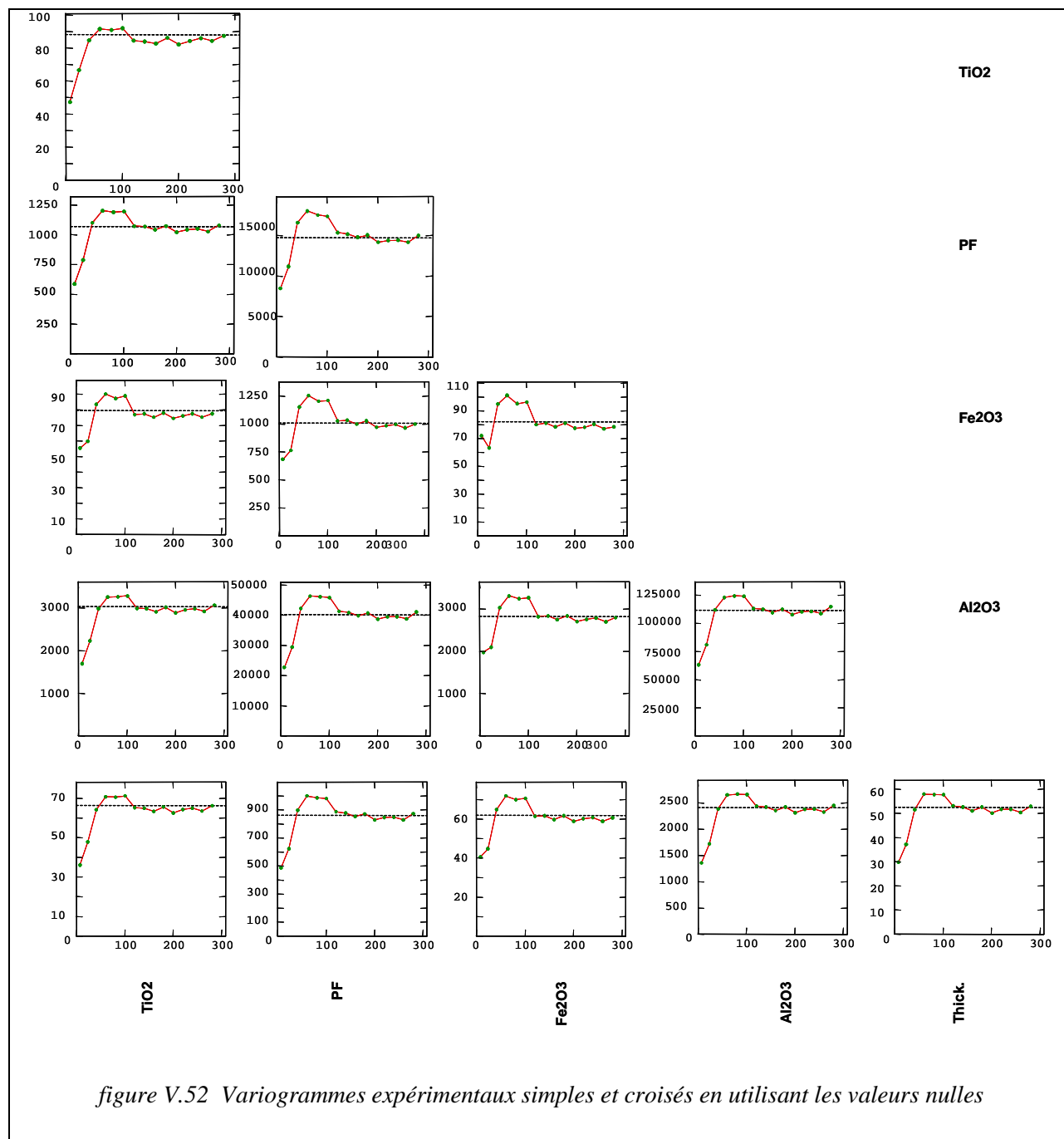
Si on néglige le premier point, à cause d'un nombre insuffisant de paires, le deuxième point est situé à 70 pour cent de la valeur du palier, cela veut dire que pour une distance pas très grande on atteint quasiment la portée du variogramme au-delà de laquelle deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne. Les variogrammes sont quasiment proportionnels à leurs variogrammes simples. La ressemblance des variogrammes de l'accumulation d'Al₂O₃ et de la puissance est remarquable. La ligne en pointillés dans le variogramme de puissance et d'Al₂O₃ montre la forme des modèles qu'on pourrait ajuster à ces variogrammes.

Le premier modèle sera un modèle avec une pente très forte à petite distance et un effet de pépité très faible, tandis que le deuxième modèle peut avoir une portée plus grande mais un effet de pépité plus important, qui arrive à 50% du palier.

Sachant que, l'écart entre les valeurs très faible (puissance nulle) et les autres valeurs expliquera une grande partie de la variation, la structure du variogramme reflétera la géométrie de ce phénomène.

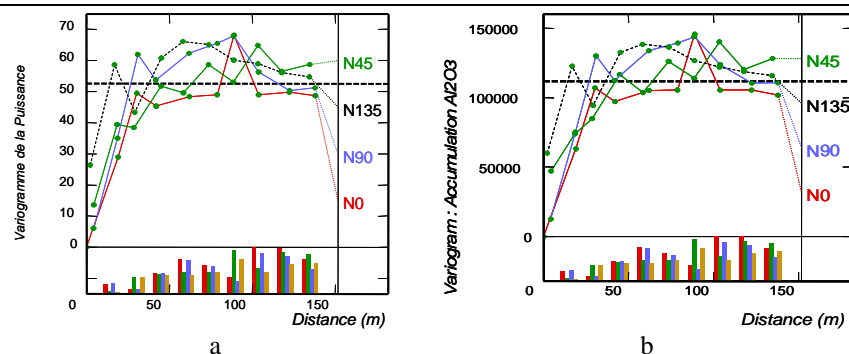
Il y a une similitude entre la forme des variogrammes. Les variogramme d'accumulation d'oxyde de fer (simple et croisés) se distinguent par une forme plus pépitique, dont la raison peut être expliquée par les valeurs aberrantes (par exemple pour la perte au feu les échantillons très riches en matière organique qui sont analysés occasionnellement, ou pour le fer les teneurs très élevées du fer (Fe₂O₃>5%)).

La figure V.52 présente les variogrammes simples et croisés de la puissance et des éléments chimiques en utilisant les valeurs nulles. Cela montre que la variation en totalité est plus structurée que la variation seule de la partie minéralisée.



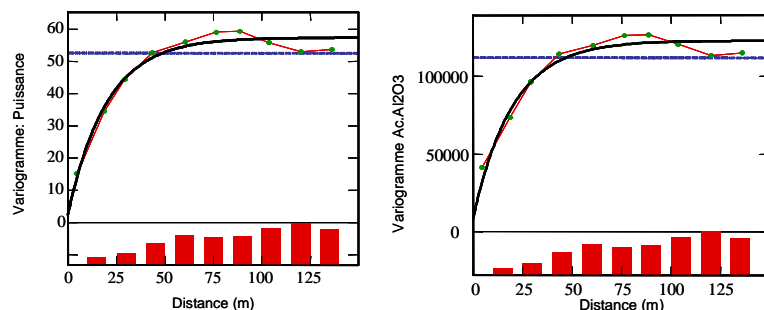
Pour étudier l'anisotropie des structures, les variogrammes expérimentaux ont été calculés selon 4 directions (Nx, où x mesure l'angle en degrés par rapport au Nord dans le sens des aiguilles d'une montre). Le nombre de paires est présenté sous forme d'histogramme. On ne distingue aucune anisotropie nette. Une partie des différences entre les variogrammes provient sans doute des grandes différences dans le nombre de paires surtout aux petites distances. Du fait de la similarité des variogrammes et de l'importance de la puissance et de l'accumulation d' Al_2O_3 , seulement les modèles de ces deux variables seront présentés dans ce mémoire. Le pas de calcul est égal à 15m avec une tolérance de 50% et une tolérance angulaire de 22.5 degrés.

figure V.53 Variogrammes de la puissance d'argile (a) et de l'accumulation d' Al_2O_3 (b), obtenus sur deux directions perpendiculaires de 0, 90 et 45, 135 degrés.



L'absence d'anisotropie a été testée en prenant des tolérances angulaires différentes. Par conséquent on a intérêt à utiliser un modèle isotrope. Pour cela le variogramme omnidirectionnel a été calculé, un modèle exponentiel a été ajusté en ajoutant un effet de pépite faible ; le modèle exponentiel peut avoir un effet d'écran dans le processus d'estimation, mais la structure pépitique l'en empêche.

figure V.54 Variogramme omnidirectionnel de la puissance d'argile et de l'accumulation d' Al_2O_3 respectivement et les modèles ajustés à ces variogrammes.



(structure gigogne avec une structure pépitique et un modèle exponentiel de portée pratique de 60m).

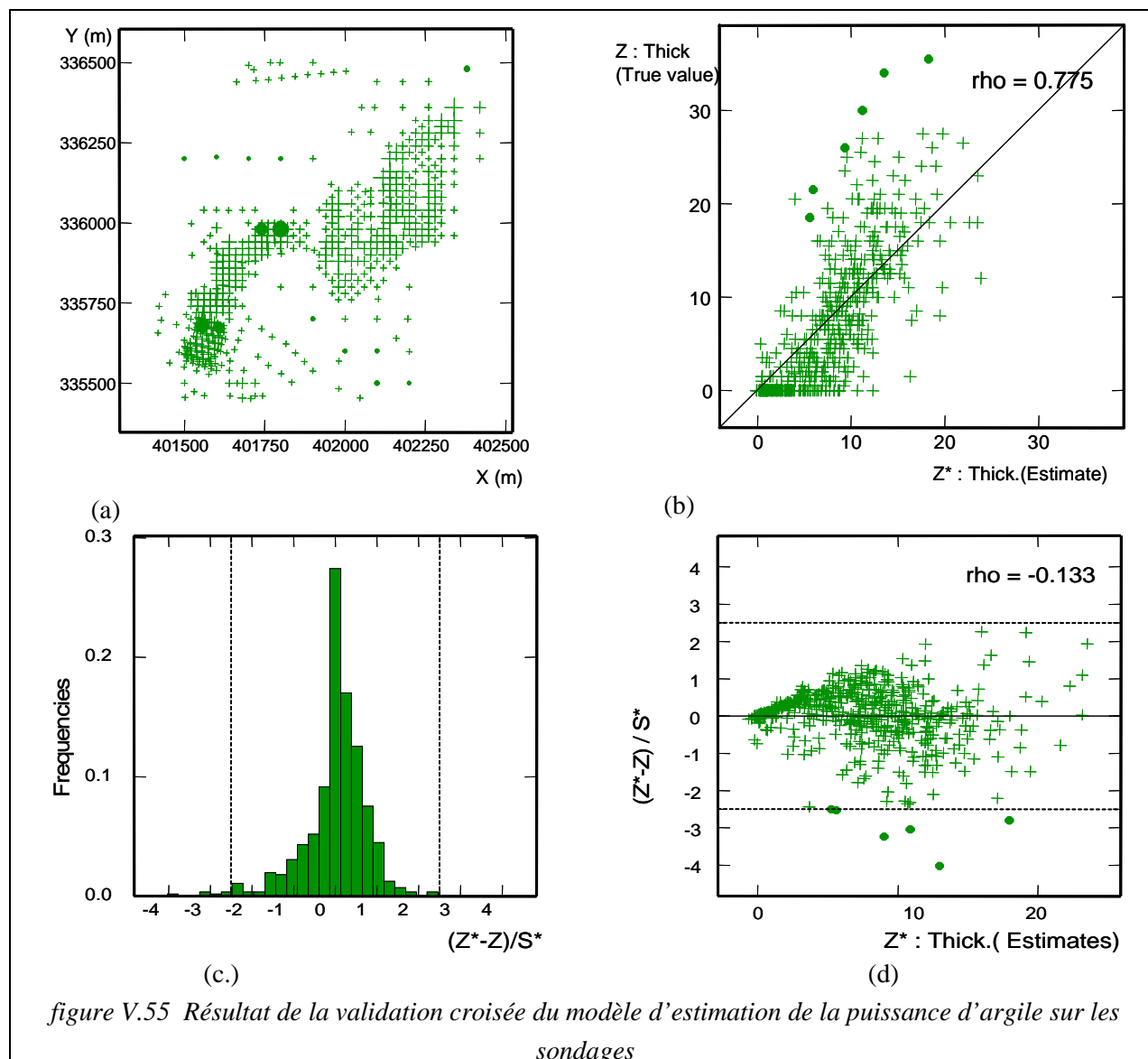
Pour que le modèle suive bien le variogramme expérimental, on a choisi un palier un peu plus grand que la variance des données. Les modèles ajustés pour la puissance d'argile et l'accumulation d' Al_2O_3 sont respectivement les suivants :

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= 2.55 * \text{pépitique} + 54.4 * \text{Exp. (60)} \\ \gamma(h) &= 8800 * \text{pépitique} + 1140000 * \text{Exp. (60)} \end{aligned}$$

La validation croisée de ce modèle a été faite en utilisant un voisinage de rayon 100m, avec 4 secteurs pour rechercher les points voisins. Le résultat de cette validation pour le modèle de la puissance est présenté dans la figure V.55. Le Tableau V.16 résume le résultat de cette validation.

Dans chaque graphique du résultat de la validation croisée, on aura les informations suivantes ;

- Présentation de l'erreur d'estimation
- Relation entre la puissance estimée et la puissance vraie d'argile dans le sondage
- Histogramme de l'erreur d'estimation normalisée
- Relation entre la puissance d'argile dans le sondage et l'erreur d'estimation normalisée



La validation montre une variance forte autour de la valeur estimée. La figure V.55 illustre une sous-estimation des valeurs élevées, et une sur-estimation des valeurs faibles. Des sondages stériles ont été estimés positifs, car quand on les masque afin de les re-estimer, ce sont les sondages positifs qui sont les plus fréquents dans leur voisinage, et de temps en temps, parmi eux, comme on l'a vu dans la figure V.49, se trouvent les sondages ayant une puissance considérable d'argile.

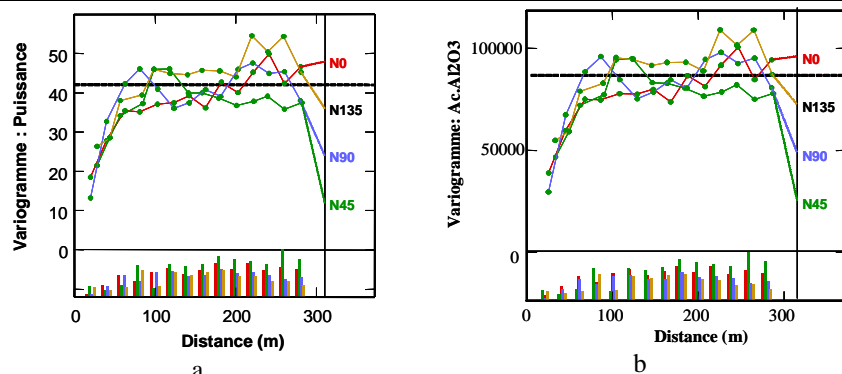
Tableau V.16 Résultat de la validation croisée du modèle de la puissance

	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.
Erreur Normalisé	-4.03	2.26	0.02	0.74
	basé sur 241 données		basé sur 238 données robustes	
	Moyenne	Variance	Moyenne	Variance
Erreur	0.18	21.54	0.37	18.37
Std. d'erreur	0.02	0.55	0.05	0.45

Afin d'améliorer le résultat de l'estimation, on divise le gisement en deux sous-domaines plus homogènes. Ces deux sous-domaines ont été choisis, en tenant compte de la forme de la sédimentation, qui se présente différemment dans la partie Sud-Ouest par rapport à la partie Nord-Est. Les variogrammes expérimentaux ont été calculés selon 4 directions pour investiguer la présence d'anisotropie. Comme

précédemment, le pas de calcul est égal à 15m avec une tolérance de 50% et la tolérance angulaire est de 22.5 degrés.

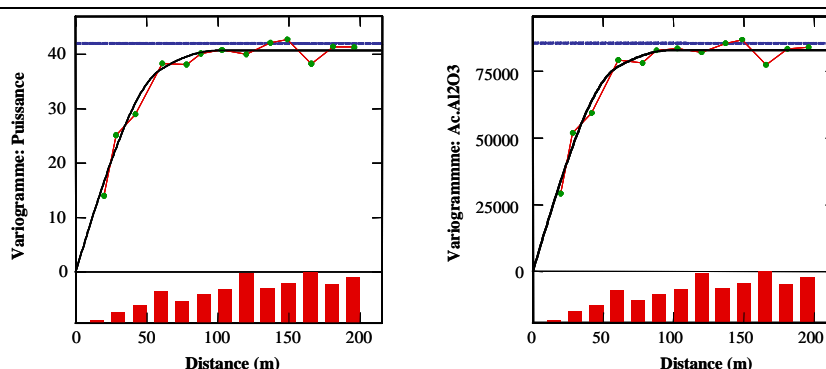
figure V.56 Variogrammes de la puissance d'argile (a) et de l'accumulation d' Al_2O_3 (b), faites selon les directions 0, 90 et 45, 135 degrés. Partie NE du gisement.



Un des problèmes importants est celui de la stationnarité directionnelle. Comparons le variogramme expérimental de direction N0 avec celui de direction N90. Le variogramme de direction N0 croît régulièrement, tandis que celui de N90 montre une bosse vers 80m.

L'absence d'anisotropie a été testée en appliquant des tolérances angulaires différentes ; en plus à cause du faible nombre des données, les variogrammes directionnels sont instables. En conséquence, on a intérêt à utiliser un modèle isotrope. Le variogramme omnidirectionnel a donc été calculé pour les deux variables. Les modèles ressemblent considérablement à celui obtenu pour la totalité du gisement. On n'attend donc pas une amélioration nette des résultats, en considérant un découpage du gisement, en zones supposées plus homogènes.

figure V.57 Variogramme omnidirectionnel de la puissance d'argile et de l'accumulation d' Al_2O_3 respectivement et les modèles ajustés à ces variogrammes (structure gigogne avec deux modèles sphériques ayant les portées pratiques de 60 m et 100m). BDR-NE



Les modèles ajustés pour la puissance d'argile et l'accumulation d' Al_2O_3 sont respectivement, les suivants :

$$\gamma(h) = 24 * \text{Sph.}(60) + 16.5 * \text{Sph.}(100)$$

$$\gamma(h) = 51900 * \text{Sph.}(60) + 31100 * \text{Sph.}(100) \quad (\text{les modèles sont proportionnels})$$

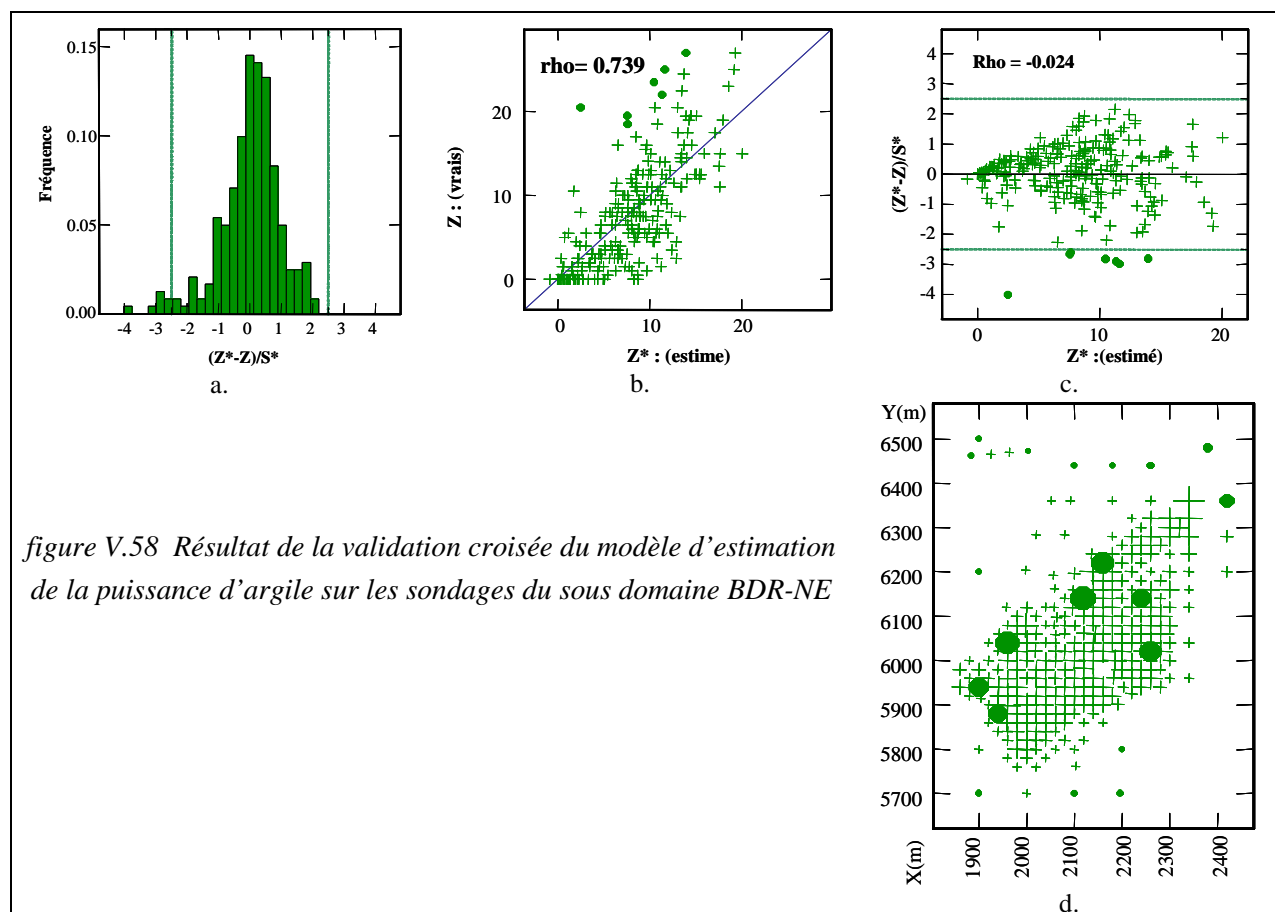
La validation croisée de ce modèle a été faite en utilisant un voisinage de rayon 100m, avec 4 secteurs pour rechercher les points voisins. Le résultat de cette validation pour le modèle de la puissance est présenté dans la figure V.58. Le Tableau V.17 résume le résultat de cette validation.

Tableau V.17 Résultat de la validation croisée du modèle de la puissance dans le sous domaine de BDR-NE

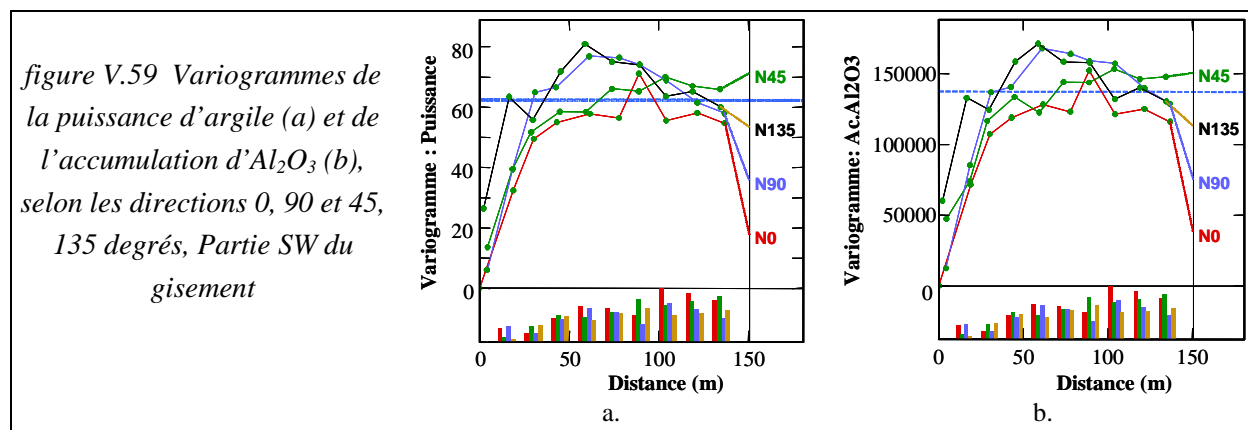
	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.
Erreur Normalisé	-4.00	2.15	0.03	0.96
	basé sur 241 données		basé sur 238 données robustes	
	Moyenne	Variance	Moyenne	Variance
Erreur	0.18	19.05	0.58	14.12
Std. d'erreur	0.03	0.92	0.12	0.67

La validation montre une variance forte autour de la valeur estimée. La figure V.58.b illustre, une sous-estimation des valeurs élevées, et une sur-estimation des valeurs faibles. Comme précédemment, les sondages dans le stérile ont été estimés positifs.

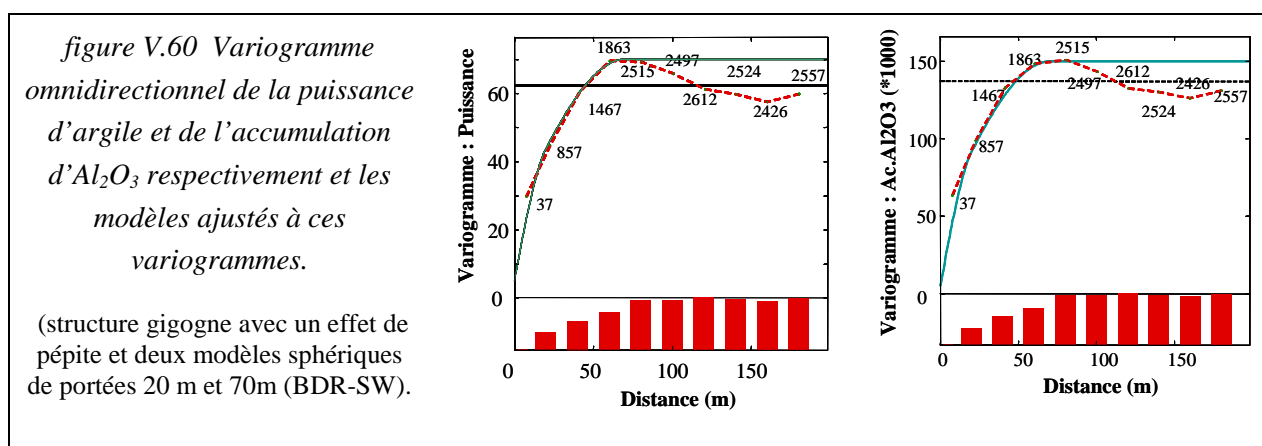
La variance d'estimation a été réduite, cela est lié au choix d'un sous-domaine plus homogène, ce qui a pour conséquence d'obtenir un palier du variogramme plus bas que pour l'ensemble du gisement. Une autre remarque est l'augmentation de l'indépendance entre l'erreur et la valeur vraie dans le cas de l'estimation sur le sous-domaine NE.



Les variogrammes expérimentaux ont été calculés selon 4 directions dans la partie Sud-ouest. Ce sous-domaine est plus chenalisé. Mais cependant les variogrammes de N0 et N90 se ressemblent plus que les variogrammes calculés dans le sous-domaine Nord-est.



L'absence d'anisotropie a été testée en impliquant des tolérances angulaires différentes, avec une tolérance angulaire de 5 degrés, et un pas de 20m ; les 3 premiers points des variogrammes sont très peu différents. C'est pourquoi un modèle isotrope est préférable.



Le pas de calcul du variogramme expérimental est de 20m. Les modèles ajustés pour la puissance d'argile et l'accumulation d' Al_2O_3 sont respectivement, les suivants :

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= 5 * \text{pépitique} + 20 * \text{Sph. (20)} + 45 * \text{Sph. (70)} \\ \gamma(h) &= 5000 * \text{pépitique} + 45000 * \text{Sph. (20)} + 100000 * \text{Sph. (70)} \end{aligned}$$

(Les modèles peuvent être ajustés d'une façon proportionnelle du fait de la ressemblance des variogrammes expérimentaux simples et croisés).

La validation croisée de ce modèle a été faite en utilisant un voisinage de rayon 80m, et 4 secteurs pour rechercher les points voisins. Le résultat de cette validation pour le modèle de la puissance est présenté dans la figure V.61. Le Tableau V.18 résume le résultat de cette validation.

La validation montre une variance forte autour des valeurs estimées. La figure V.61.b illustre une sous-estimation des valeurs élevées, et une sur-estimation des valeurs faibles, liées au lissage des variations brutales, déjà mentionné. Comme dans la partie Nord-est, des sondages du stérile ont été estimés positifs.

Tableau V.18 Résultat de la validation croisée de modèle de la puissance dans le sous domaine de BDR-SW

	Minimum	Maximum	Moyenne	Std. Dev.
Erreur Normalisé	-3.96	2.16	0.01	0.76
	basé sur 241 données		Basé sur 238 données robustes	
	Moyenne	Variance	Moyenne	Variance
Erreur	0.15	23.51	0.43	18.62
Std. d'erreur	0.01	0.58	0.06	0.45

La puissance dans ce sous domaine est plus variée, d'où une variance d'estimation plus grande, mais la moyenne de l'erreur d'estimation est plus faible.

Le but de l'étude présentée dans ce chapitre est de montrer la variabilité générale des variables principales. La valeur des variogrammes correspondant à une distance de 30m représente plus de 50 pourcent de la variance totale, tandis que, actuellement, la maille de sondage est de 40m dans la partie Nord-Est du gisement et de 20m dans le sous-domaine Sud-Ouest.

Le résultat de cette estimation donne une évaluation très générale des réserves (figure V.62). Afin d'avoir une estimation plus détaillée, le gisement sera estimé par bancs de 2 m d'épaisseur.

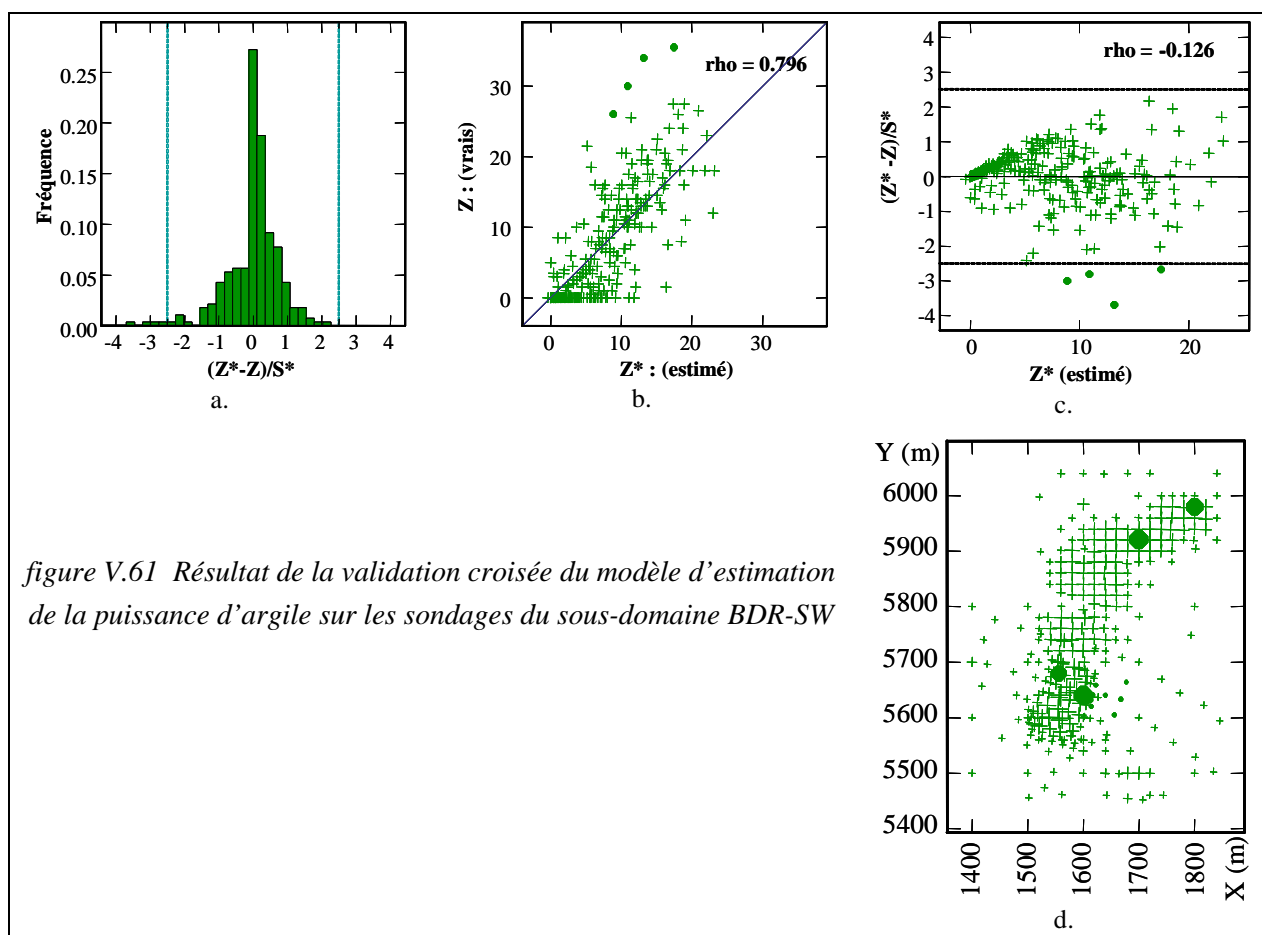
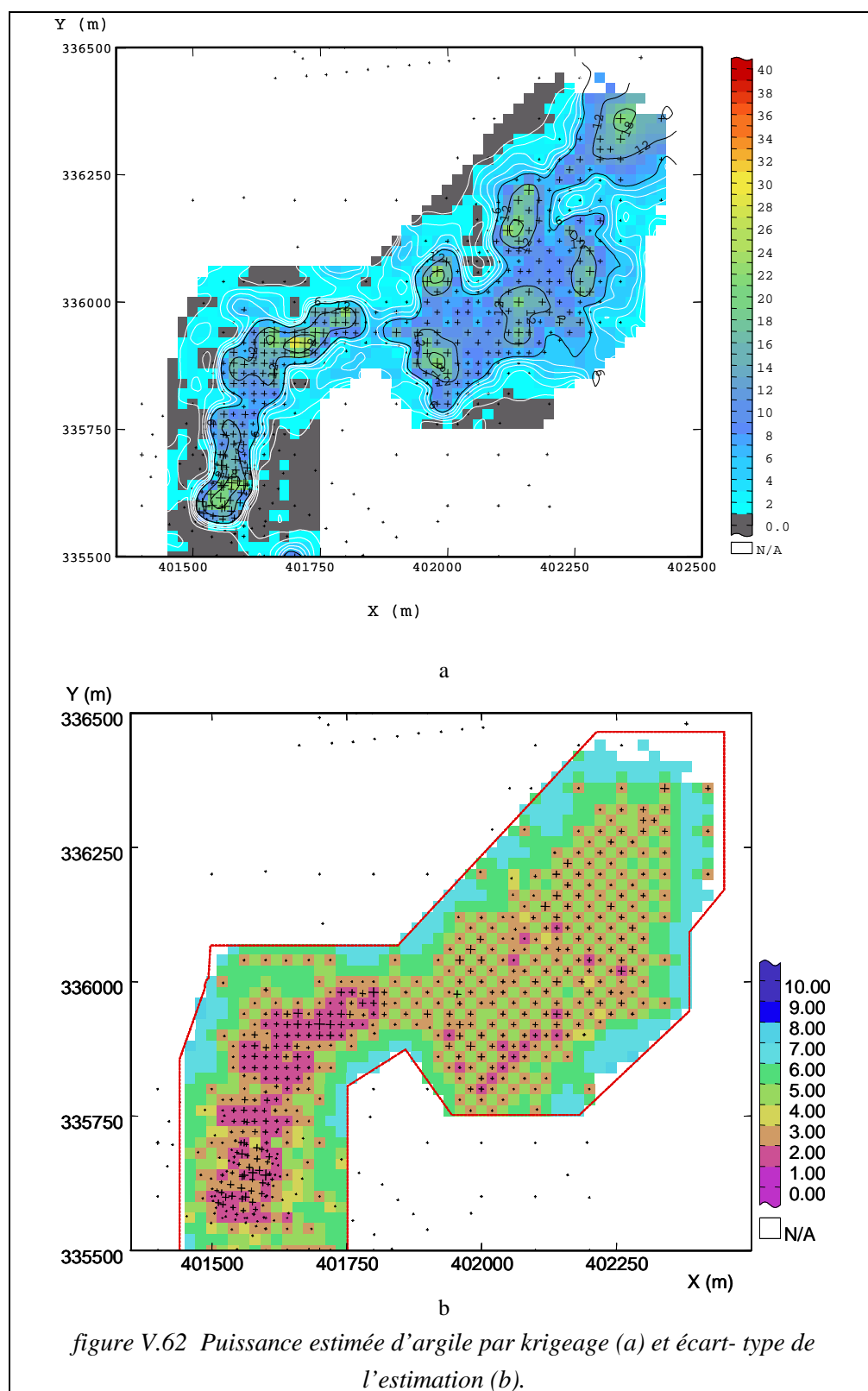


figure V.61 Résultat de la validation croisée du modèle d'estimation de la puissance d'argile sur les sondages du sous-domaine BDR-SW

L'estimation de l'accumulation est une méthode acceptable pour les gisements de type nappe, d'une faible épaisseur et d'une extension latérale importante. Mais dans le cas d'un gisement comme BDR, composé des différentes sous parties et d'une épaisseur d'argile importants, cela ne sera qu'une évaluation générale. Cette méthode ne permet pas d'avoir la classification des réserves par classe d'argile surtout dans la direction verticale.

Le gisement BDR présente des zones très distinctes, chaque sous gisement mérite d'être étudié individuellement. La complexité du gisement est importante même dans le cas de l'accumulation. L'erreur importante de l'estimation est mise en évidence, du fait de la corrélation spatiale faible des variables et la maille de sondage très large utilisée pour l'estimation de la partie NE du gisement BDR.

Une étude de l'estimation de l'accumulation pour chaque séquence du kaolin peut nous aider à améliorer la qualité des résultats, mais cela demanderait des informations supplémentaires afin de distinguer les échantillons des séquences différentes.



V.4.3. Estimation par bancs de 2m d'épaisseur

L'estimation de l'accumulation et de la puissance de minerai est un outil intéressant pour une approximation globale des tonnages dans le gisement. Si la couche de minerai n'est pas très épaisse, en pratique, le résultat de cette estimation peut être utilisé directement. Dans le cas d'un gisement comme BDR où l'épaisseur totale des dépôts d'argile atteint quelques dizaines de mètres, par superposition de séquences différentes, il est plus intéressant d'avoir des informations plus détaillées de la répartition des diverses catégories de minerai.

V.4.3.1. Introduction

Le calcul de régularisation est très simple, mais il faut être très prudent quant à la manière de le réaliser. La régularisation des échantillons se fait sur une taille (longueur) fixe. Elle consiste à découper le sondage en segments de longueur fixe. La teneur de chaque segment est obtenue par une moyenne pondérée des échantillons situés dans ce segment. On peut réaliser le découpage, en commençant par la tête de sondage. Une autre manière de procéder est de faire le découpage par des tranches horizontales.

Dans le cas des gisements kaoliniques du bassin des Charentes, la situation est un peu plus compliquée. La récupération de sable dans le carottier est extrêmement faible. L'échantillon pris dans la matière qui sort du forage, n'est pas très représentatif. Le passage du minerai au stérile n'est pas continu comme dans une minéralisation métallique déposée par diffusion d'un flux hydrothermal. Parfois le contact entre les couches de sable et d'argile est observable sur le terrain. En pratique, on peut arrêter l'exploitation lorsqu'on atteint le sable. Normalement on évite la dilution de l'argile par le sable : pour AGS, l'analyse des échantillons dilués par du stérile ne présente aucun intérêt. L'échantillonnage par une longueur constante (le long d'une carotte), revient à accepter la dilution par du stérile. Comme on l'a dit, cela peut être évité lors de l'exploitation du gisement (une petite pelle mécanique permet l'exploitation d'une couche d'épaisseur d'un demi-mètre). En conséquence, la taille des bancs exploités sera finalement imposée par la géométrie des couches.

Actuellement AGS affecte des valeurs par défaut pour remplacer certains échantillons sans analyse, en fonction de leur code lithologique (Tableau V.19).

L'utilisation de valeurs par défaut est une réponse au problème des lacunes d'information. On impose ainsi une certaine limite pour l'estimation, et on applique la valeur par défaut (faible) lors de l'estimation des blocs voisins. Cela aura un effet de dilution sur la valeur estimée.

Par contre une valeur fixe partout, pour une lithologie définie, réduit la variance des données, surtout lorsque les échantillons ont une longueur élevée.

L'histogramme de la taille (longueur) des échantillons par classe lithologique d'argile a été présenté dans la figure V.9. Les échantillons d'une longueur plus grande que 2.5 m sont très rares.

Actuellement on évite d'avoir un échantillon argileux très long, et la carotte est coupée en échantillons ayant une taille plus petite. La taille des échantillons est un multiple d'un demi mètre (0.5m, 1m, 1.5m, 2m ...).

Comme on a vu précédemment la régularisation des données pose certains problèmes dont le choix d'un support plus petit que la longueur de l'échantillon, qui aboutit au découpage d'un échantillon sur supports constants, ayant une valeur identique. Le choix d'une longueur plus grande que la taille de certains échantillons, pose question pour l'utilisation de valeurs sur des supports incomplets. Pour éviter les problèmes mentionnés, on propose de régulariser les données de la manière suivante.

Tableau V.19 Valeurs par défaut assignées par code lithologique et critère de couleur pour le gisement BDR

Code	PF	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O
8	10	30	1.7	2	
10	11.2	30	1.4	1.2	1.6
11	11.4	34	1.3	1.2	1
12	12.5	36	1.4	1.9	1
13	12.7	39	1.3	1.7	1.2
14	13.6	41.5	1.3	1	0.7
15	17.5	42	1.2	1.1	0.6
17	16.7	44	1.2	0.5	0.1
84	8	15	2	2	
85	10	25	2	2	
87	10	20	2	15	
93	8	0	2	2	
94	8	5	1.7	2	

V.4.3.2. Régularisation par tranche

Dans cette méthode on coupe le gisement par les tranches horizontales. Une épaisseur de 2m a été choisie comme la taille de tranche et pour le calcul de la régularisation. Ce choix a été fait en tenant compte de la figure V.9 et de façon à avoir une taille appropriée et pratique pour l'exploitation. La somme des épaisseurs d'argile, appelée puissance partielle, est calculée dans les tranches horizontales successives. Sa valeur sera comprise entre 0 et 2m. Pour les variables chimiques, on utilisera le produit de l'épaisseur par la teneur moyenne des passées argileuses. Cela peut être appelé une accumulation partielle. La puissance partielle représente la proportion d'argile en volume dans chaque segment. L'accumulation partielle représente la masse d'élément chimique dans l'argile de chaque segment (figure V.63).

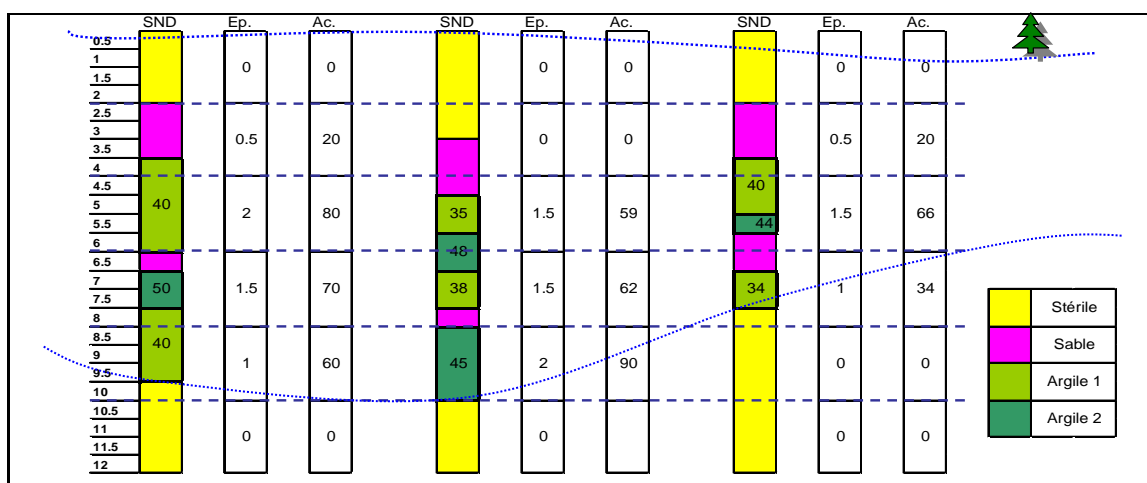


figure V.63 Représentation graphique du calcul de la régularisation par banc de 2 m. d'épaisseur.

Après l'estimation de l'accumulation et de la puissance partielles dans chaque bloc, on en déduira la proportion d'argile et la teneur moyenne de chaque élément chimique.

V.4.3.3. Analyse statistique

La somme des puissances partielles des sondages calculée banc par banc, sera utilisée comme critère de délimitation de l'espace à estimer. Cette délimitation augmente le niveau de stationnarité des variables. La limite choisie pour cette étude est figurée par deux lignes rouges dans la figure V.64. On travaillera donc sur les bancs ayant une altitude entre 72m et 22m. La figure V.49 peut être utile, pour avoir une image de la puissance d'argile dans le sondage (voir le chapitre sur l'estimation de l'accumulation).

La moyenne des éléments chimique se calcule en divisant la somme de leur accumulation par la somme des puissances partielles pour chaque niveau d'altitude. La variation de cette variable est plus faible dans la limite retenue que dans la totalité du gisement. On note une ressemblance entre les moyennes de PF et d' Al_2O_3 . La variation de la moyenne de Fe_2O_3 est très faible. Les statistiques plus détaillées sont présentées dans le Tableau V.20.

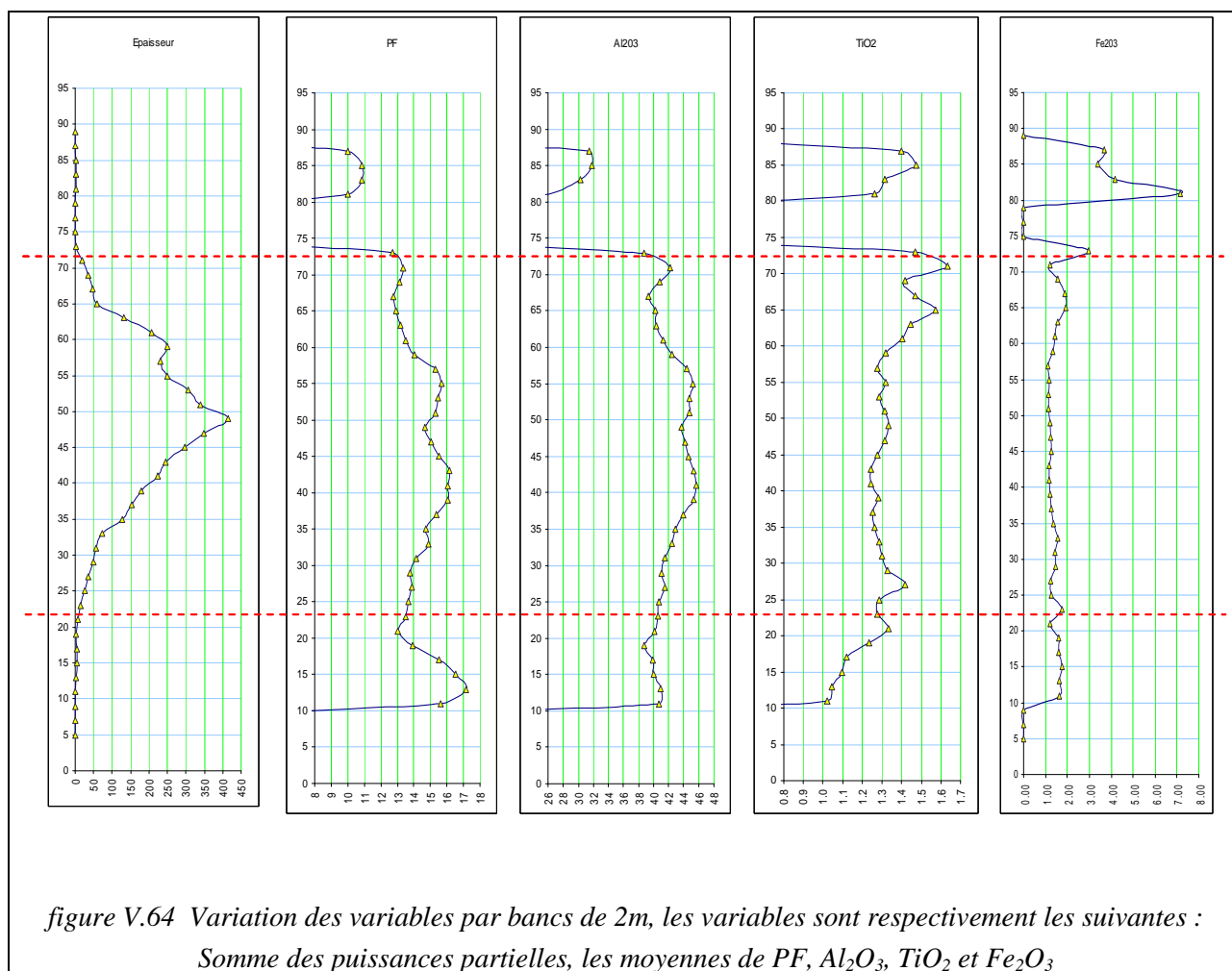


Tableau V.20 Statistique sur l'épaisseur et les éléments chimiques des échantillons kaoliniques par tranche horizontale (cas des bancs de 2 m d'épaisseur)

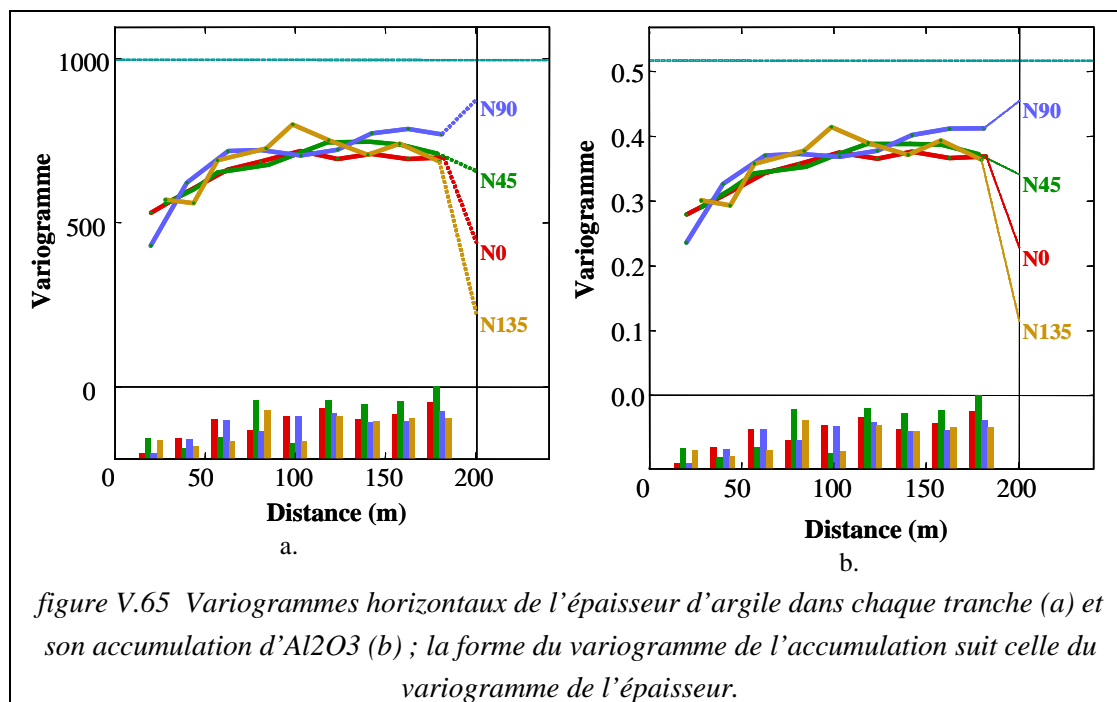
Z	N	Somme					Moyenne				
		Ep	Ac.Pf	Ac.Al	Ac.Ti	Ac.Fe	Ep	PF	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
71	16	19.5	260.0	822.3	31.8	23.9	1.22	13.34	42.17	1.63	1.22
69	29	34.7	455.1	1416.4	49.2	54.6	1.20	13.11	40.80	1.42	1.57
67	34	46.0	587.6	1806.5	67.7	87.4	1.35	12.77	39.27	1.47	1.90
65	49	59.2	765.1	2379.0	93.0	113.5	1.21	12.93	40.20	1.57	1.92
63	108	132.6	1748.0	5345.7	191.4	207.7	1.23	13.18	40.32	1.44	1.57
61	149	207.8	2809.5	8579.8	291.4	297.9	1.39	13.52	41.29	1.40	1.43
59	161	250.3	3514.5	10631.2	330.5	331.1	1.55	14.04	42.48	1.32	1.32
57	150	231.1	3534.4	10264.4	295.2	258.7	1.54	15.29	44.41	1.28	1.12
55	167	250.0	3915.1	11297.3	329.9	290.6	1.50	15.66	45.18	1.32	1.16
53	192	306.6	4748.0	13732.3	394.5	351.2	1.60	15.48	44.78	1.29	1.15
51	231	339.6	5187.0	15203.6	445.5	391.4	1.47	15.28	44.77	1.31	1.15
49	257	414.6	6079.5	18146.4	552.8	495.7	1.61	14.67	43.77	1.33	1.20
47	233	349.7	5259.0	15456.7	458.6	429.7	1.50	15.04	44.20	1.31	1.23
45	190	296.7	4602.7	13242.4	377.9	376.1	1.56	15.51	44.63	1.27	1.27
43	160	244.9	3953.6	11094.2	304.4	284.1	1.53	16.14	45.30	1.24	1.16
41	143	223.2	3580.2	10204.3	277.4	262.0	1.56	16.04	45.71	1.24	1.17
39	118	179.3	2877.2	8121.9	229.9	218.0	1.52	16.05	45.31	1.28	1.22
37	95	152.9	2350.5	6715.4	191.4	196.6	1.61	15.37	43.91	1.25	1.29
35	85	126.8	1867.1	5437.7	160.1	173.6	1.49	14.73	42.90	1.26	1.37
33	53	74.1	1102.7	3147.4	95.2	116.3	1.40	14.87	42.46	1.28	1.57
31	40	57.2	809.0	2378.8	74.4	81.6	1.43	14.14	41.57	1.30	1.43
29	31	49.5	681.0	2032.0	65.8	72.1	1.60	13.76	41.05	1.33	1.46
27	22	36.0	500.4	1496.6	50.9	45.2	1.64	13.90	41.57	1.42	1.26
25	16	25.0	341.8	1018.8	32.1	32.0	1.56	13.67	40.75	1.29	1.28
23	8	13.0	175.7	527.6	16.6	23.0	1.63	13.52	40.58	1.28	1.77

V.4.3.4. Analyse variographique

Dans cette étude, la partie nord-est du gisement a été choisie pour juger de l'intérêt de ces nouvelles variables : accumulation et puissance partielles. Les variogrammes expérimentaux ont été calculés selon 4 directions horizontales. Le pas de calcul du variogramme est de 20m, et la hauteur des tranches verticales est de 1m, afin de guider le calcul du variogramme dans les niveaux complètement horizontaux.

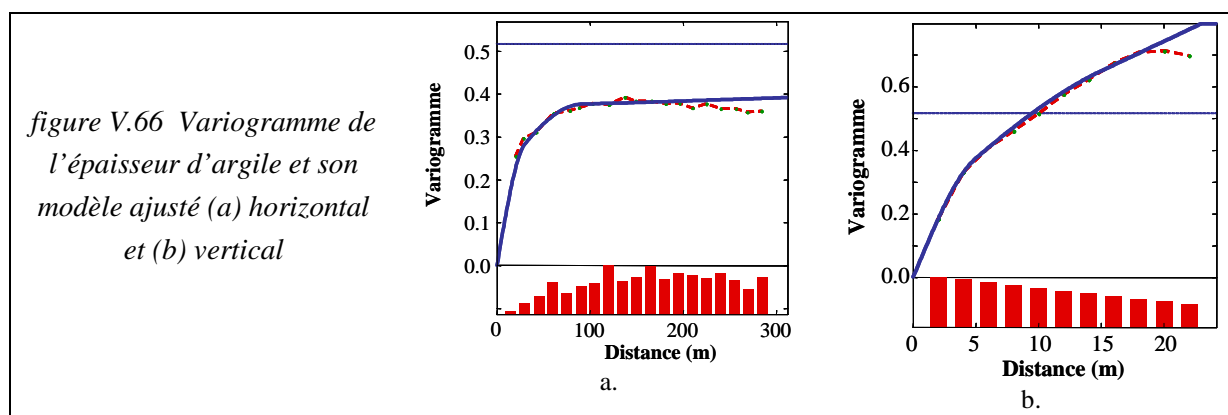
Naturellement, une anisotropie structurale et une anisotropie géométrique existent si on compare la direction verticale et les directions horizontales. On a essayé de modéliser l'isotropie zonale (structurale) à l'aide d'un modèle linéaire.

La structure spatiale n'est pas très forte, car le premier point du variogramme atteint presque 50 pourcent de la variance totale, et 60 pourcent du palier du variogramme horizontal. Compte tenu de la continuité des couches kaoliniques aux petites distances, on évite d'ajuster un modèle ayant un effet de pépite important, et cette partie du modèle sera considérée comme un modèle sphérique de courte portée. La continuité du variogramme vertical, aux petites distances, justifie ce choix. L'anisotropie est modélisée en introduisant un modèle linéaire qui a une anisotropie verticale. La pente du modèle linéaire est considérablement plus faible verticalement qu'horizontalement.



La figure V.67 montre les variogrammes expérimentaux de l'épaisseur et le modèle ajusté. On exprime le modèle par la formule schématique suivante, (le premier chiffre entre parenthèse est la portée horizontale et le deuxième est la portée verticale).

$$\gamma(h) = 0.2 * \text{Sphérique}(30,5) + 0.17 * \text{Sphérique}(90,15) + 0.14 * \text{Linéaire}(2000,7.5)$$

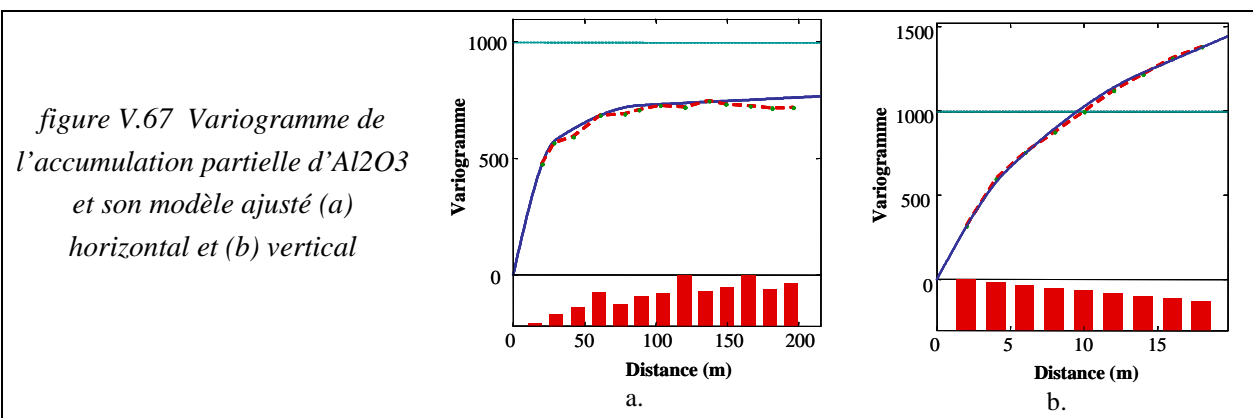


La figure V.68 présente les variogrammes expérimentaux, et le modèle ajusté pour l'accumulation partielle d' Al_2O_3 . Ce modèle est similaire à celui de l'épaisseur, sans lui être exactement proportionnel.

Ce variogramme s'exprime sous la forme suivante ;

$$\gamma(h) = 450 * \text{Sphérique}(30,14) + 250 * \text{Sphérique}(90,5) + 300 * \text{Linéaire}(1000, 8)$$

La validation croisée est utilisée pour choisir pour ces variables le modèle et le voisinage glissant de l'estimation les mieux adaptés. Avant effectuer le calcul du krigeage, le test de validation croisée a été fait sur les valeurs régularisées des sondages. L'estimation a été faite par un ellipsoïde ayant un rayon de recherche de 100m dans les directions horizontales et 7m dans la direction verticale. On utilise 4 secteurs pour chercher les données dans le voisinage.



Le résultat de la validation croisée est présenté dans le Tableau V.21 et le tableau V.22. La moyenne d'erreur de l'estimation de l'épaisseur d'argile par tranche reste très faible. La variance de l'erreur d'estimation apparaît faible, mais n'est pas très satisfaisante pour l'exploitant. Sur 4389 points qui ont une erreur d'estimation qui reste dans le niveau de confiance de 95%, la variance d'erreur est 0.11, ce qui correspond à un écart-type de 0.33.

Cette variance importante est due à la nature de la variable, on constate sur les variogrammes que le modèle arrive au palier à une faible distance. La structure la plus importante a une portée de 30m. Un autre fait qui augmente la variance provient de la base du calcul de la méthode de validation croisée, en ne considérant pas le point à estimer on change la géométrie d'estimation (pour plus de détails voir [Isaaks et Sirivastava 1989, Ch.20](#)).

Tableau V.21 Résultat de la validation croisée du modèle de l'épaisseur d'argile, dans le sous domaine de BDR-NE

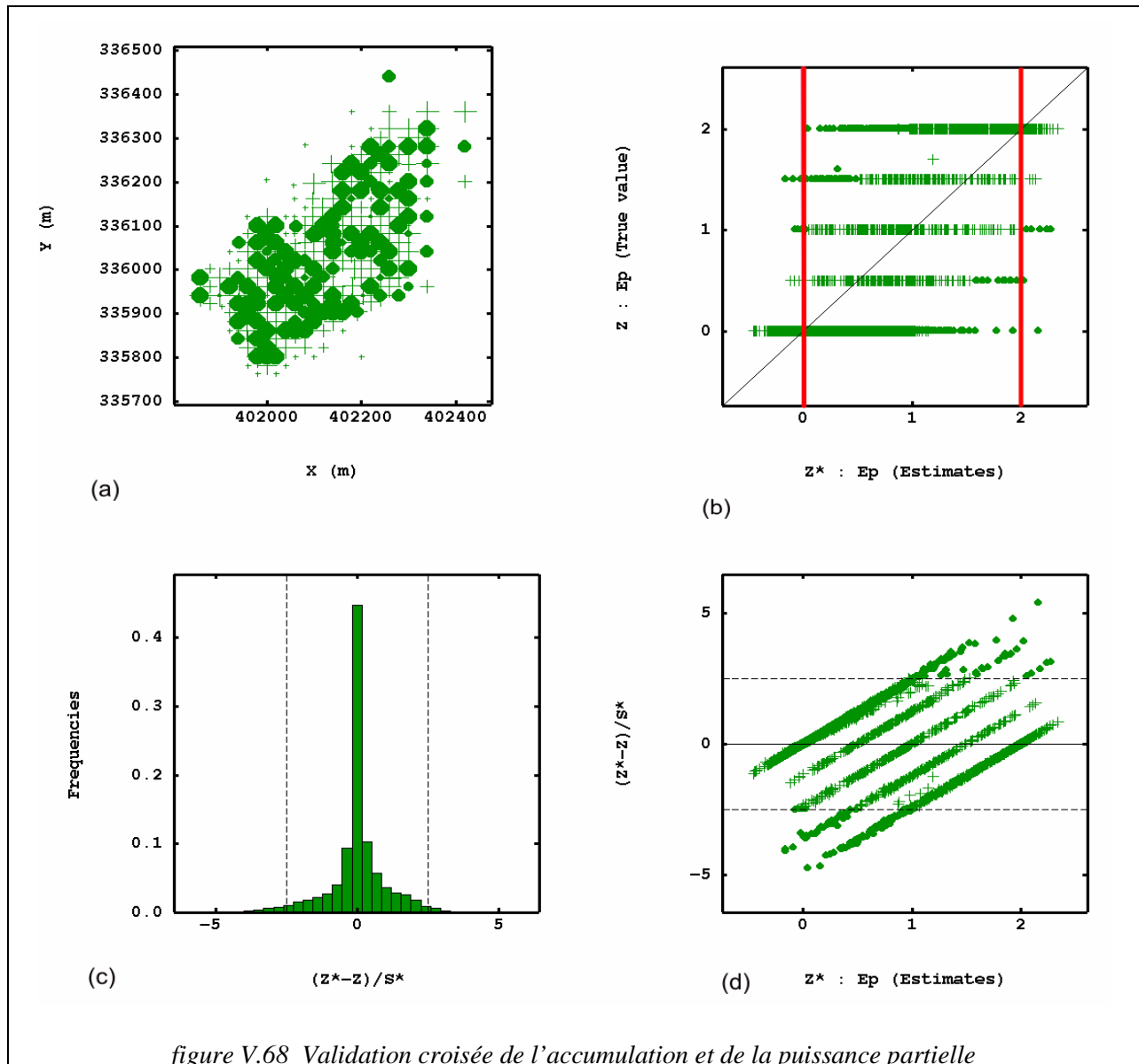
	basé sur 4607 données		basé sur 4389 données robustes	
	Moyenne	Variance	Moyenne	Variance
Erreur	0.003	0.18	0.02	0.11
Std. d'erreur	0.004	1.09	0.05	0.64

Pour l'accumulation d'alumine par tranche (ou l'accumulation partielle), la moyenne de l'erreur d'estimation est faible, mais la variance de l'erreur qui est 154 (un écart-type d'environ 12.5) apparaît importante comme dans le cas de l'estimation de l'épaisseur par tranche. Ce qui montre l'incertitude non négligeable de l'estimation.

Pour l'accumulation, le résultat n'est pas très différent. La variance reste très importante.

Tableau V.22 Paramètres statistiques de la validation croisée du modèle de variogramme de l'accumulation d' Al_2O_3 , dans le sous domaine de BDR-NE

	basé sur 4607 données		basé sur 4268 données robustes	
	Moyenne	Variance	Moyenne	Variance
Erreur	0.20	346.08	0.61	154.74
Std. d'erreur	0.008	1.47	0.04	0.66



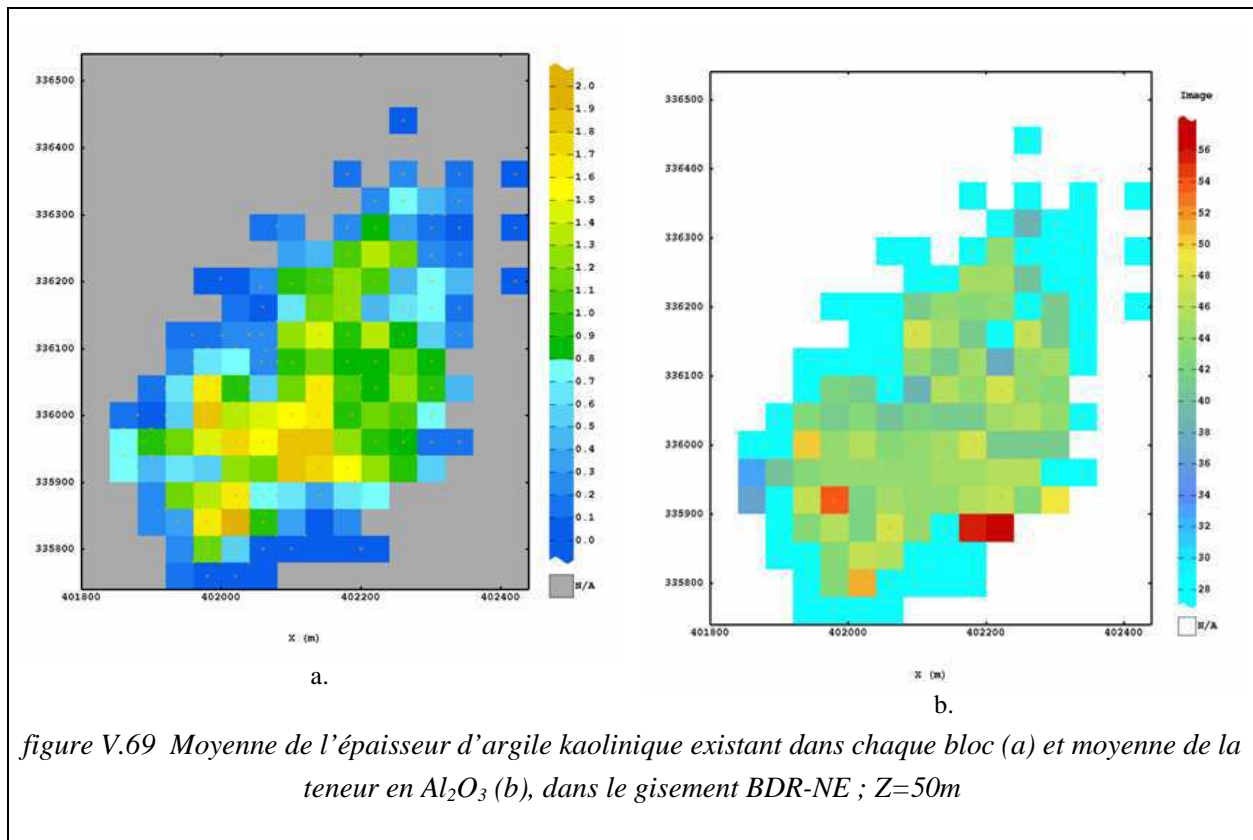
V.4.3.5. Krigeage de l'accumulation et de la puissance, calcul de la teneur en éléments principaux

Le premier problème vient des valeurs non justifiables : l'épaisseur ne peut pas être négative et dans le cadre régularisé doit être inférieure ou égale à 2m. La forme particulière de la figure V.68.d vient de ce que l'épaisseur de l'argile dans les échantillons régularisés est un multiple d'un demi-mètre.

On corrigera cette erreur en remplaçant les valeurs négatives de l'estimation de l'épaisseur et de l'accumulation par zéro. Aucun bloc n'a une épaisseur estimée plus grande que la hauteur de banc. On utilisera l'épaisseur et les accumulations krigées pour calculer la teneur moyenne des éléments chimiques (on prendra le rapport de l'accumulation par la puissance).

L'estimation a été faite à une maille régulière de 40m*40m correspondant à la maille d'échantillonnage dans le sous-domaine du nord-est. La hauteur des blocs à estimer est 2m, ce qui correspond à la longueur des échantillons régularisés. Pour l'estimation de chaque bloc, une discrétisation du bloc par des sous blocs de 8*8*1 a été utilisée. Le voisinage de recherche des données est un ellipsoïde de rayons principaux de 100m *100m *4 m subdivisé en 4 secteurs.

La figure V.69 présente le résultat d'estimation pour la tranche située à Z=50m, la moyenne de l'épaisseur peut être utilisée comme fonction de récupération. Cela doit être pris en compte, lors du calcul de réserves globales.



La méthode d'estimation du gisement par banc horizontal, permet d'utiliser des résultats d'estimation pour l'exploitation du gisement tranche par tranche. Dans cette méthode, l'épaisseur d'argile dans les blocs de chaque banc est estimée et on peut l'utiliser comme une valeur moyenne de l'argile récupérable. Via cette méthode, on minimise l'effet de la géométrie des couches d'argile et du problème de la régularisation et du découpage des échantillons. Au contraire de la méthode d'estimation par l'accumulation totale, cette méthode permet d'avoir une classification des argiles de chaque bloc et d'analyser la variation verticale.

La taille de 2m est choisie pour l'épaisseur des bancs, en tenant compte de la capacité des engins d'exploitation d'AGS. Un des problèmes de cette méthode est le sens de l'épaisseur de l'argile des échantillons dans chaque tranche et la continuité verticale de l'argile. Pour les échantillons d'une épaisseur inférieure à 2m, on ne peut pas prendre en compte le positionnement exact de la partie kaolinique dans la tranche horizontale.

V.5. Conclusion

Un des buts de cette étude est d'analyser diverses applications des outils géostatistiques dans le cas des gisements kaoliniques des Charentes. La géostatistique étant utilisée depuis longtemps pour l'estimation des gisements miniers, a prouvé sa capacité dans ce domaine. Toutefois, l'application des outils géostatistiques dans le domaine des minéraux industriels n'est pas si fréquente et dans le cas du kaolin on dispose de peu d'études publiées.

Cet état de fait provient probablement de l'homogénéité apparente des dépôts. Dans le cas des gisements des Charentes, l'importance de la précision de l'estimation à l'entrée de l'usine s'est accrue, pour respecter, lors de la production, des spécifications clients de plus en plus exigeantes. L'étude présente analyse les problèmes de mise en application d'outils géostatistiques, pour pouvoir atteindre cet objectif elle fait une critique de la mise en œuvre de l'estimation actuellement utilisée chez le producteur.

Les gisements du kaolin des Charentes malgré une apparence très continue, présentent des complexités au niveau de leurs géométries et des répartitions de teneurs de divers minéraux à l'intérieur du dépôt qui donnent différentes catégories d'argile. Dans les gisements contenant des argiles hyperalumineuses, qui constituent une part croissante des réserves d'AGS, du fait de leurs tailles assez grandes, les modèles de distribution spatiale apparaissent moins continus et plus complexes que précédemment.

La prise des échantillons pose des problèmes pour la régularisation des données qui est un des premiers pas essentiels d'une étude géostatistique. L'impact de la méthode d'échantillonnage en segment de différentes longueurs est présenté dans le chapitre précédent, dans ce chapitre on a essayé d'expliciter son impact sur le modèle du variogramme.

Le changement de la géométrie du milieu à estimer a soulevé, d'une part, de sérieuses questions sur la mise en relation des données d'un point de vu correspondant à la réalité géologique de la formation des dépôts (voir la discussion sur l'anisotropie zonale). D'autre part, il a été nécessaire d'examiner la signification mathématique et physique du support d'observation et de la cible d'estimation. La relation du volume-variance est négligée dans les cas où la variation de taux de compaction ou de décompaction entre les deux surfaces du guidage est importante.

Malgré les ressemblances observés dans le cas du gisement BDR-NE entre des variogrammes calculés sur des géométries cartésiennes et « horizontalisées », de façon générale, les variogrammes cartésiens ne sont pas utilisables directement dans l'estimation dans une nouvelle géométrie dans la quelle la relation spatiale entre les données a été changée.

L'étude variographique sur quelques gisements a mis en évidence une différence sensible entre leurs modèles spatiaux. Malgré une certaine ressemblance dans la structure spatiale des variables entre les gisements ou parties de gisement de même type, en aucun cas on ne peut se dispenser de l'analyse structurale, spécifique à chaque gisement ou à chaque sous-gisement. La différence entre les deux zones du seul gisement de BDR en est une preuve. Une autre étude a porté sur la sensibilité de l'estimation au choix du modèle de variogramme et a été menée sur la zone densément échantillonnée de BDR. La comparaison entre les résultats d'estimation avec le modèle issu d'une étude variographique détaillée et ceux issus du modèle par défaut utilisé par AGS, souligne une fois de plus la nécessité d'une étude statistique et structurale pour chaque cas, considéré individuellement.

Les variables chimiques mesurées ne sont pas des variables additives, l'impact de cette propriété est étudié sur l'accumulation des données et sur un cas d'étude. Cette étude montre que tant que les

valeurs des échantillons restent très proches, l'estimation directe de ces variables conduit à un biais faible par rapport au résultat de l'estimation géostatistique. Par contre, dans le cas de la présence locale et importante de matière organique, ces écarts deviennent importants, d'un point de vue industriel.

L'estimation de l'accumulation et de la puissance d'argile pour les dépôts mono couche et d'une faible épaisseur paraît utile. Dans le cas d'un gisement comme le BDR, où l'épaisseur de dépôt est importante et pour lequel le dépôt se compose des 2 ou 3 séquences différentes, parfois entrecoupées de lentilles de sable, on a besoin d'une méthode d'estimation dans l'espace 3D sur des unités les plus petites possibles (unités de sélectivité minière ou SMU). L'estimation du gisement en tranches horizontales permet de ne pas entrer dans le problème de la régularisation.

L'estimation de la moyenne de l'épaisseur d'argile par tranche et donnant la moyenne de la teneur de la partie argileuse dans chaque tranche horizontale du gisement, est une méthode qui peut convenir à l'exploitant. Elle permet, en effet, de gérer la délimitation sable-argile en respectant le taux de récupération estimé (la moyenne de l'épaisseur d'argile / l'épaisseur de la tranche) en connaissant la teneur moyenne pour la partie exploitable.

L'utilisation des valeurs par défaut pour remplacer les données manquantes, change l'allure du variogramme. On propose d'utiliser le krigeage de l'indicatrice et une méthode telle que l'estimation de l'épaisseur d'argile par tranche pour éviter le remplacement des données manquantes par les données fictives.

La définition des surfaces de guidage peut avoir un impact plus important sur le résultat d'estimation que le choix du modèle de corrélation spatiale. La dissimulation de l'anisotropie zonale dans le variogramme des données décompactées, est une preuve du mélange des différentes séquences du dépôt.

La maille optimale de sondage, pour l'exploitant, dépend de la fonction de corrélation de la variable et de la précision exigée de l'estimation. En se contentant d'une précision de 1.5% sur la teneur en Al_2O_3 , une maille de sondage de 40*40m sera suffisante pour les gisements les plus continus tels que Chierzac et St Georges, tandis que pour le Bois des Rentes la maille de sondage doit être plus serrée (au moins 20*20m).

Malgré un contexte qui paraît assez éloigné des conditions idéales d'une estimation géostatistique, les outils mis en œuvre ont permis de résoudre, au moins partiellement, le problème de l'estimation dans les gisements kaoliniques des Charentes. Certains de ces outils, par anticipation comme en temps réel, tels que le calcul de la variance d'estimation et de la variance de dispersion, permettent de mieux gérer la prospection d'un gisement, puis la conduite de son exploitation.

VI. SIMULATION DES QUALITES D'ARGILE ET DES LITHOFACIES

Un des paramètres fondamentaux dans la conduite de l'outil industriel de production d'AGS est la « qualité » du produit final obtenu. Pour chaque gamme de produit, il existe des spécifications sur la composition chimique et les propriétés industrielles, qui doivent être respectées.

La construction de stocks ciblés permet de réduire la variation de la qualité à l'entrée de l'usine. Une étude est réalisée afin de démontrer la meilleure efficacité de choix basés sur les résultats issus de l'estimation géostatistique par rapport à l'utilisation de la méthode du voisin le plus proche, pour l'essentiel actuellement appliquée.

Dans les exploitations des kaolins charentais, des stocks de réserves, par catégorie, sont utilisés pour réduire la variabilité de la teneur. Par ce moyen, l'alimentation de l'usine est plus homogène (à grande échelle). Un deuxième avantage de ces stocks est le lissage des erreurs d'estimation. L'erreur sur la teneur des tranches de stocks homogénéisés est inférieure à l'erreur d'estimation de chaque bloc in situ. Dans cette étude, on tente de comparer diverses méthodes d'estimation du point de vue de leur précision en termes de classification.

Comme on l'a vu dans les chapitres précédents, la géométrie détaillée des dépôts présente une grande complexité. Dans le chapitre V l'estimation de la puissance réduite de kaolin dans les tranches de gisement a permis de répondre en partie à cette question. L'intérêt de l'estimation de l'indicateur a aussi été présenté. Dans le chapitre qui suit, on utilise des méthodes géostatistiques plus avancées pour simuler les lithofaciès. Cette approche nous permettra d'étudier l'incertitude sur la géométrie des dépôts d'argile et leur continuité.

Parmi les méthodes de simulation, la méthode de la simulation pluri-gaussienne est choisie puisqu'elle prend en compte le loi des contacts entre les faciès et ne demande pas le loi de la distribution de la taille et de la forme des objets (éléments de dépôts) ce qui est le cas de la simulation booléenne.

Cette méthode est utilisée pour la simulation des classes de réserves (basées sur les fourchettes de la teneur en Al_2O_3). Cette étude est faite en utilisant les classes de qualité en tant que variable catégorielle.

VI.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente une comparaison entre la méthode du krigeage et celle du plus proche voisin. L'aptitude de ces méthodes est étudiée comme un outil de sélection. La classification de la qualité des réserves se fait par les grilles de la teneur en Al_2O_3 (cf. Tableau II.10 Grille de la classification des réserves d'argiles). La moyenne de chaque classe de réserve et l'écart-type de ses composants seront calculés, ces deux paramètres peuvent nous donner des critères simples pour l'apprécier l'efficacité du choix de classification.

Dans la deuxième partie du chapitre on présente l'application des méthodes de la simulation des variables catégorielles comme la lithologie du gisement. La modélisation des hétérogénéités des dépôts est actuellement un problème majeur des caractéristiques des réserves. La distance entre les forages est trop importante pour que les corrélations entre les faciès argileux ou les sables soient toujours simple.

Un des problèmes de l'estimation est celle de la définition stérile/kaolin, dans les gisements métallique on utilise la notion de teneur de coupure pour faire cette coupure. Pour les gisements kaoliniques, la présence de sable, de colorants ou de matières organiques joue un rôle important sur la décision d'exploitation du minerai. Comme on a vu précédemment, on ne dispose pas des analyses des argiles sableuses, ni des sables argileux, et l'estimation des variables chimiques sera limitée aux argiles kaoliniques industrielles. Pour définir la qualité d'estimé "argile" ou "stérile", on propose l'estimation de l'épaisseur d'argile par les tranches horizontales du gisement, et le krigeage de l'indicateur.

Une approche plus probabiliste est celle de la simulation des faciès ou des catégories. On peut simuler les indicateurs des lithofaciès. Une des méthodes les plus puissante de simulation catégorielle est celle de la simulation plurigaussienne. Cet outil permet de prendre en compte les relations de contact entre les cibles à simuler. L'utilisation des variables gaussiennes (à la place des indicateurs), permet d'avoir une cohérence entre les résultats de la simulation des faciès. D'autre part on évite les problèmes du krigeage des indicateurs.

VI.2. Comparaison des méthodes d'estimation à l'aide de la simulation géostatistique

Ce qui est plus important chez AGS, c'est la « qualité » du produit. Pour chaque gamme du produit, il existe des spécifications restreintes sur la composition chimique et les propriétés industrielles, qui doivent être respectées. La sensibilité économique est faible à l'envers des différentes qualités. Le coût de la production pénalise la fabrication des produits hauts de gamme, en conséquence les marges de bénéfice varient peu. La diversification des produits comme on l'a vu précédemment (voir Economie du kaolin) est une stratégie de stabilisation.

Dans les exploitations des kaolins charentais, les tas des catégories de réserve sont utilisés pour réduire la variabilité de la teneur. Par ce moyen, l'alimentation de l'usine sera plus homogène (à grande échelle), la deuxième utilisation de ces tas est le lissage des erreurs de l'estimation. L'erreur de la teneur sur les tranches de tas homogénéisé est inférieure à l'erreur d'estimation de chaque bloc. Dans cette étude, on tente de comparer diverses méthodes d'estimation du point de vue de leur précision en termes de classification.

Il existe des nombreuses études qui comparent les méthodes géostatistique avec les méthodes anciennes de l'estimation (les méthodes traditionnelles). Pour effectuer ce genre d'étude, on a besoin des valeurs réelles des teneurs des blocs du gisement. Dans les mines métalliques, les contrôles de la teneur à l'usine de traitement permettent d'avoir des mesures suffisamment détaillées et proches de la teneur des blocs exploités.

Cela n'est pas le cas des gisements des Charentes. La valeur simulée de la teneur est prise comme la teneur réelle dans cette étude

Comme on l'a déjà vu (V.2.6), la définition de la cible d'exploitation pose des problèmes liés à la géométrie des couches d'argile. La méthode actuellement appliquée s'appuie sur l'expérience des exploitants, pour définir une zone plus ou moins homogène autour d'un point échantillonné. Il n'existe pas de relevés cartographiques des zones d'influences de chaque échantillon, utilisé par l'exploitant au moment de l'extraction des argiles, donc la méthode du plus proche voisinage est choisie comme une approximation de l'extraction réalisée.

VI.2.1. Mise en oeuvre de la comparaison des méthodes d'estimation

Pour mettre en évidence l'efficacité des méthodes géostatistiques, une étude comparative entre ces méthodes et la méthode du plus proche voisin est réalisée

Deux gisements de BDR-NE et St. Georges ont été choisis à titre d'exemple. Le processus peut être résumé de la façon suivante : La teneur en alumine a été simulée à l'intérieur de chaque gisement. Chaque réalisation de la simulation est considérée comme la réalité. Tenant compte de la maille des sondages disponibles, les blocs d'une taille de $20 \times 20 \times 0.5$ m (pour BDR-NE) et $10 \times 10 \times 0.5$ m (pour St. Georges) ont été estimés par le krigeage. La valeur krigée de chaque bloc est utilisée comme critère de classification (pour les classes : voir Tableau II.10 Grille de la classification des réserves d'argiles).

D'autre part le résultat de la méthode du plus proche voisin (PPV) est utilisé comme le critère de classification. La teneur simulée de chaque sous-bloc peut être comparée avec la teneur estimée de son bloc respectif. Ensuite, on calcule l'écart-type et la moyenne de chaque fourchette pour les deux méthodes.

VI.2.1.1. Simulation géostatistique

Une simulation consiste à inventer une variable régionalisée qui ressemble à celle qu'on étudie, c'est-à-dire qui respecte ses caractéristiques structurales et les valeurs mesurées aux points de données (dans ce cas on l'appelle la simulation conditionnelle). Ces techniques reposent sur l'interprétation de la variable régionalisée (ici ; la teneur en alumine) comme une réalisation d'une fonction aléatoire et sur une modélisation de sa loi spatiale (Emery 2001b).

Les techniques de simulation géostatistiques ont pour objectif de reproduire la loi spatiale de la fonction aléatoire étudiée $Z(x)$. C'est en général une contrainte très forte, car en pratique il n'est pas possible d'inférer tous les moments de la loi spatiale de $Z(x)$, sauf dans certains cas très particuliers comme celui d'une fonction aléatoire multigaussienne.

On a recours à la transformation de la fonction aléatoire $Z(x)$ en une fonction aléatoire gaussienne de $Y(x)$. Le problème de la simulation se réduit ainsi à simuler une fonction aléatoire gaussienne en utilisant la loi de fonction spatiale de $Y(x)$. Les techniques de simulation conditionnelle visent à construire des images réalistes de la variable régionalisée, restituant les mesures effectuées aux points d'échantillonnage.

La transformation inverse permet d'avoir les valeurs simulées en respectant la distribution initiale des données ($Y^{sc} \rightarrow Z^{sc}$).

Les simulations conditionnelles sont utiles pour estimer des grandeurs qui ne sont pas directement accessibles par krigeage. Ainsi, en géostatistique minière, la probabilité que la teneur en métal d'une unité de sélection (de support plus volumineux que celui des échantillons) soit supérieure à une teneur de coupure est évaluée par la fréquence avec laquelle les teneurs simulées de cette unité dépassent la teneur de coupure. Un tel outil est une aide précieuse pour la prise de décision et la planification du projet minier (Emery 2004).

Les méthodes de la simulation conditionnelle sont largement présentées par Journel et Huijbergts (1978), Chilès et Delfiner (1999), Lantuéjoul (2002).

Il existe des différentes méthodes de simulation dans un champ gaussien, dans cette étude on utilise la méthode des bandes tournantes qui est une technique générale permettant de passer d'un processus unidimensionnel à un processus multidimensionnel (Matheron 1972, 1973).

VI.2.1.2. Le Krigeage

Les techniques de krigeage permettent d'estimer localement les valeurs prises par une variable régionalisée à partir d'un échantillonnage de cette dernière. Cependant, la propriété de lissage induite par le krigeage empêche d'apprécier la variabilité des valeurs inconnues (non mesurées) : ainsi, l'histogramme des valeurs estimées est moins dispersé que celui des valeurs réelles ; le variogramme des valeurs estimées n'est pas non plus représentatif de la réalité.

VI.2.1.3. Le plus proche voisin

Dans cette méthode la valeur de chaque sous-bloc sera égale à la valeur de l'échantillon le plus proche au centre des sous-blocs. Dans le cas des sous-blocs très petits, cette méthode est équivalente à la méthode du polygone d'influence.

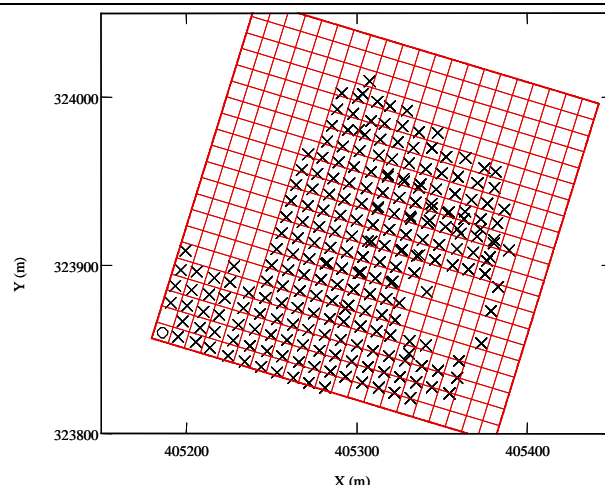
VI.2.2. Etude sur le gisement Saint-Georges

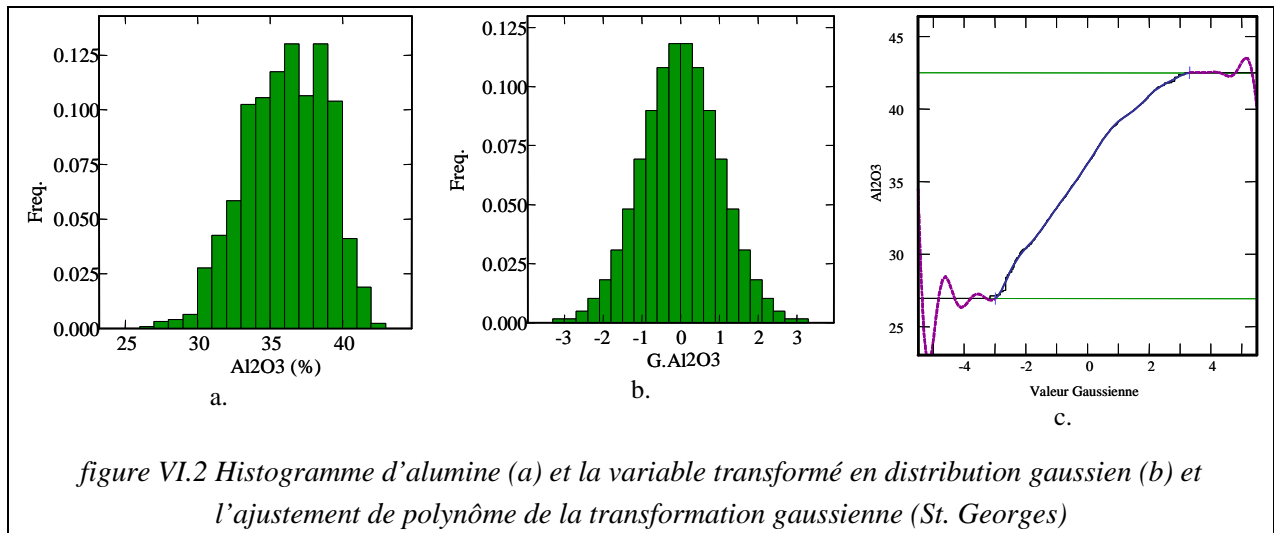
Le gisement de St. Georges est choisi comme cas d'étude, car il présente comme on le verra plus tard d'une corrélation spatiale plus forte de la teneur et la maille de sondage est suffisamment étroite pour l'évaluation du gisement, dans ce cas on attend de bons résultats pour les deux méthodes.

La taille des blocs d'estimation est choisie égale à la taille de la maille de sondage qui est 10*10m, la hauteur des blocs est 0.5m. La figure VI.1 montre l'implantation des sondages et le positionnement des blocs d'estimation.

En comparaison avec le BDR-NE, la minéralogie du gisement St. Georges paraît plus simple, on constate un histogramme de la teneur en alumine, peu asymétrique et sans la forme bi/multi modale et sans valeur extrême. La moyenne de la teneur est 36.1%, la teneur varie de 26.9 à 42.5, et l'écart-type des données régularisées (sur un support d'une longueur de 1m) est seulement 2.8. L'histogramme de la teneur et la variable gaussienne (anamorphose) et l'ajustement de polynôme de Hermite sont présentés dans la figure VI.2.

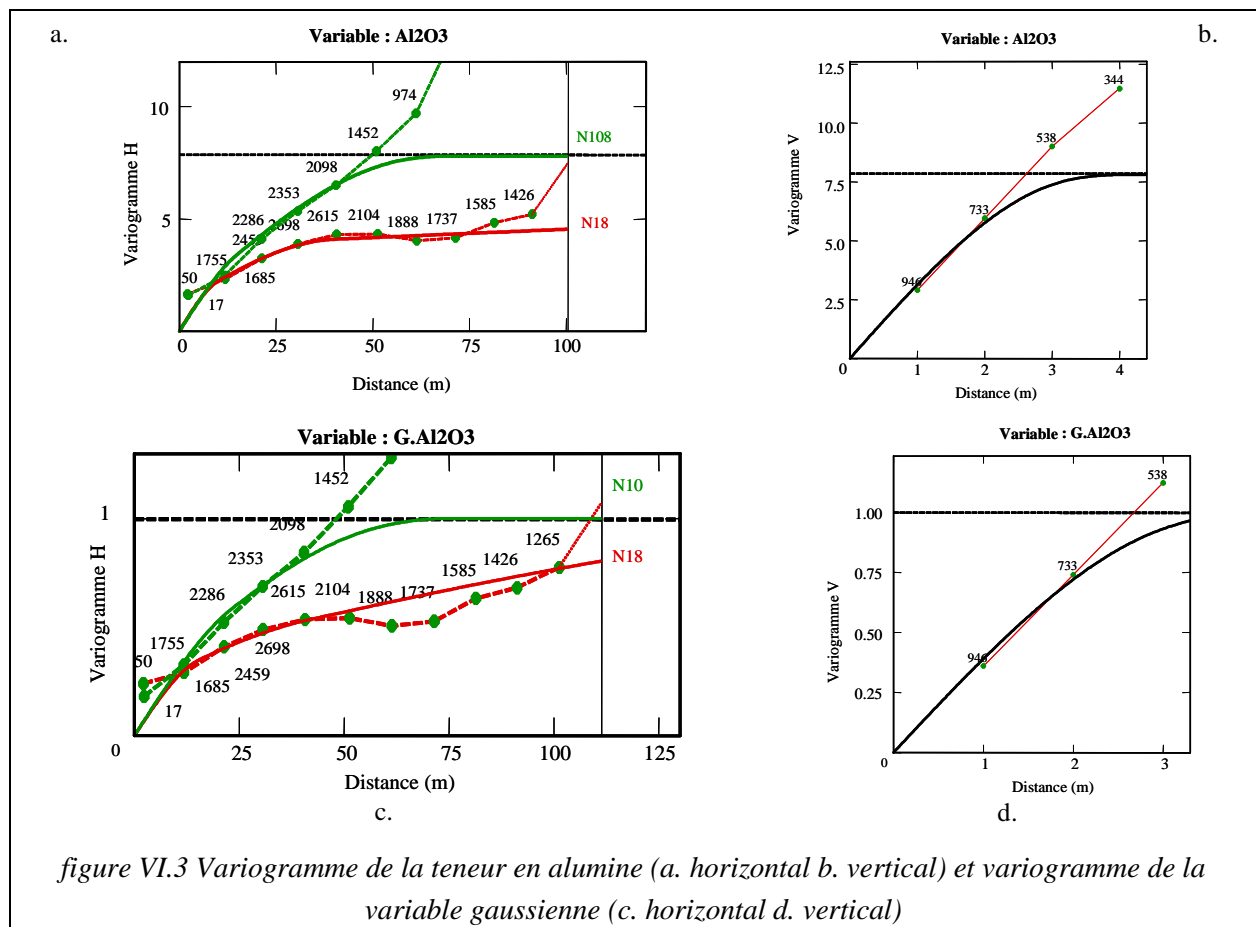
figure VI.1 Implantation des sondages et le positionnement des blocs d'estimation (St. Georges)





On constate une anisotropie géométrique entre les variogrammes calculés parallèles aux directions principales de maille des sondages (N18 et N108). Cette anisotropie n'est pas sensible sur le variogramme de l'indicateur du kaolin (La valeur de l'indicateur est égale à 1 pour les kaolins industriels et égale à zéro pour les autres), donc un variogramme moyen est calculé pour présenter la variabilité spatiale horizontale. La différence entre la forme du variogramme des données avec celle du variogramme de la variable gaussienne est très faible. En tenant compte la complexité de l'anisotropie, l'ajustement du modèle est fait en les donnant plus de poids que premiers pas du variogramme.

On présente les modèles des variogrammes d'alumine, de la variable gaussienne et l'indicateur du kaolin par les équations suivantes ;



Variogramme d'Al₂O₃

$$\begin{cases} \gamma_{N18}(h) = 1.2 * Sph.(h/10) + 2.6 * Sph.(h/40) + 4 * Sph.(h/800) \\ \gamma_{N108}(h) = 1.2 * Sph.(h/15) + 2.6 * Sph.(h/60) + 4 * Sph.(h/70) \\ \gamma_V(h) = 1.2 * Sph.(h/3) + 2.6 * Sph.(h/4) + 4 * Sph.(h/4) \end{cases}$$

Variogramme de G.Al₂O₃

$$\begin{cases} \gamma_{N18}(h) = 0.20 * Sph.(h/15) + 0.15 * Sph.(h/40) + 0.65 * Sph.(h/800) \\ \gamma_{N108}(h) = 0.20 * Sph.(h/25) + 0.15 * Sph.(h/60) + 0.65 * Sph.(h/70) \\ \gamma_V(h) = 0.20 * Sph.(h/3) + 0.15 * Sph.(h/4) + 0.65 * Sph.(h/4) \end{cases}$$

Variogramme de l'indicatrice

$$\begin{cases} \gamma_H(h) = 0.16 * Sph.(h/20) + 0.09 * Sph.(h/100) \\ \gamma_V(h) = 0.16 * Sph.(h/1.5) + 0.09 * Sph.(h/6) \end{cases}$$

La figure VI.4.a, montre pour chaque bloc la relation entre la valeur estimée par krigeage et par le PPV. On constate une corrélation forte entre le résultat de ces deux méthodes, la figure VI.4.b présente l'histogramme de l'écart-type de l'erreur d'estimation de la variable gaussienne sur les sous-blocs d'une taille de 2*2*0.5m. Cet histogramme donne une idée générale de la ressemblance des différentes réalisations d'une simulation géostatistique. La moyenne de l'erreur d'estimation est égale à 0.43, qui est moins important que la moyenne d'erreur du gisement BDR-NE.

La corrélation forte entre la valeur krigée des blocs et la valeur du plus proche voisin aboutit à une cohérence de la classification des réserves par ces deux critères, le Tableau VI.1 montre les effectifs des sous-blocs classés dans les différentes grilles des réserves par ces deux critères. On constate que le krigeage a tendance à classer moins de sous-blocs dans les grilles très pauvres ou très riches. Cela vient de la répartition de la teneur à l'intérieur des blocs à estimé d'une taille de 10*10*1m, qui est moins dispersée que la distribution de la teneur des sous-blocs. Cette différence peut être calculée par la relation d'additivité.

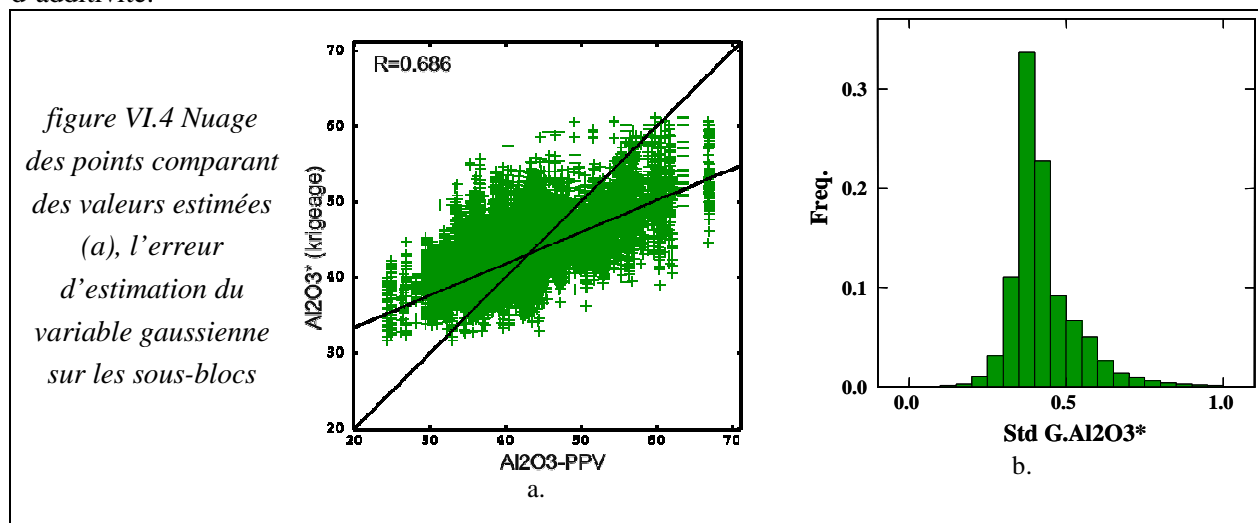
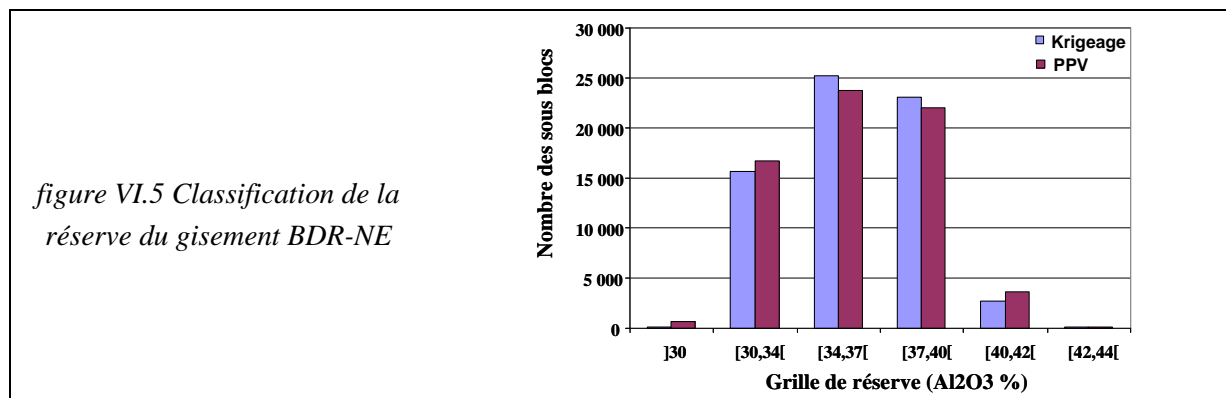


Tableau VI.1 Comparaison des effectifs des sous blocs classés par le krigeage et le PPV, (St. Georges)

KClass	VClass						Somme
	]30	[30,34[	[34,37[	[37,40[	[40,42[	[42,44[
]30	78	78	14				170
[30,34[	556	11996	2984	182			15718
[34,37[	25	4294	16748	4049	64		25180
[37,40[		299	3964	16785	1977	11	23036
[40,42[			30	1002	1540	143	2715
[42,44[				1	60	7	68
Somme	659	16667	23740	22019	3641	161	66887

La cohérence de classification reste plus importante que celle du gisement de BDR-NE. La classe 37-40 reste, dans les deux méthodes, la classe la plus fréquente du gisement.

La figure VI.5 résume la classification des argiles de la carrière de St Georges par grille d' Al_2O_3 . Pour plus apprécier l'aptitude à la classification de ces deux méthodes, on s'intéresse à la moyenne de la classe sur 10 réalisations de la simulation de la teneur en alumine des sous-blocs (Tableau VI.2) et à l'écart-type par classe (Tableau VI.3).



On constate une amélioration très importante de respect du critère PPV pour les teneurs de chaque classe par rapport au cas précédent, en tous cas le krigeage reste mieux placé de ce point de vue. La moyenne de la somme des carrés des écarts de la moyenne calculée de chaque classe à la moyenne théorique de chaque classe (pour Al_2O_3 entre 30 et 44) sur 10 simulations est calculée, elle est égale à 4.8 pour le PPV et 4.2 pour le krigeage.

Au premier regard sur l'écart-type des classes, on constate une baisse nette de la grandeur de l'écart-type des classes. Dans les gisements plus structurés et mieux connus par une maille de sondage plus dense, les classes seront plus homogènes.

On a vu que les deux critères donnent des résultats assez proches sur la moyenne des classes, en revanche sur l'écart-type des classes, le krigeage confirme sa supériorité. Le résultat est présenté dans le Tableau VI.3 les cellules colorées en jaune montrent des cas où l'écart-type est plus petit que celui qui correspond à l'autre critère. Le krigeage gagne le meilleur score dans 52/60 cas.

Tableau VI.2 Moyenne de la teneur simulée des sous-blocs dans chaque classe (St Georges)

VClass	Moyenne d' Al_2O_3									
	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim5	Sim6	Sim7	Sim8	Sim9	Sim10
]30	30.89	30.44	30.99	31.66	31.14	30.89	30.44	30.99	31.66	31.14
[30,34[	33.04	32.98	33.21	33.30	33.16	33.04	32.98	33.21	33.30	33.16
[34,37[	35.68	35.51	35.61	35.62	35.58	35.68	35.51	35.61	35.62	35.58
[37,40[	38.12	38.10	38.10	38.08	38.09	38.12	38.10	38.10	38.08	38.09
[40,42[	40.13	40.10	40.08	40.14	39.88	40.13	40.10	40.08	40.14	39.88
[42,44[	41.70	41.70	41.29	41.49	41.76	41.70	41.70	41.29	41.49	41.76
KClass	Moyenne d' Al_2O_3									
	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim5	Sim6	Sim7	Sim8	Sim9	Sim10
]30	30.61	28.43	29.70	29.60	30.41	30.61	28.43	29.70	29.60	30.41
[30,34[	32.76	32.78	32.92	33.07	32.88	32.76	32.78	32.92	33.07	32.88
[34,37[	35.58	35.37	35.54	35.55	35.51	35.58	35.37	35.54	35.55	35.51
[37,40[	38.29	38.24	38.23	38.20	38.24	38.29	38.24	38.23	38.20	38.24
[40,42[	40.32	40.54	40.49	40.42	40.13	40.32	40.54	40.49	40.42	40.13
[42,44[	40.86	41.77	41.48	41.37	41.10	40.86	41.77	41.48	41.37	41.10

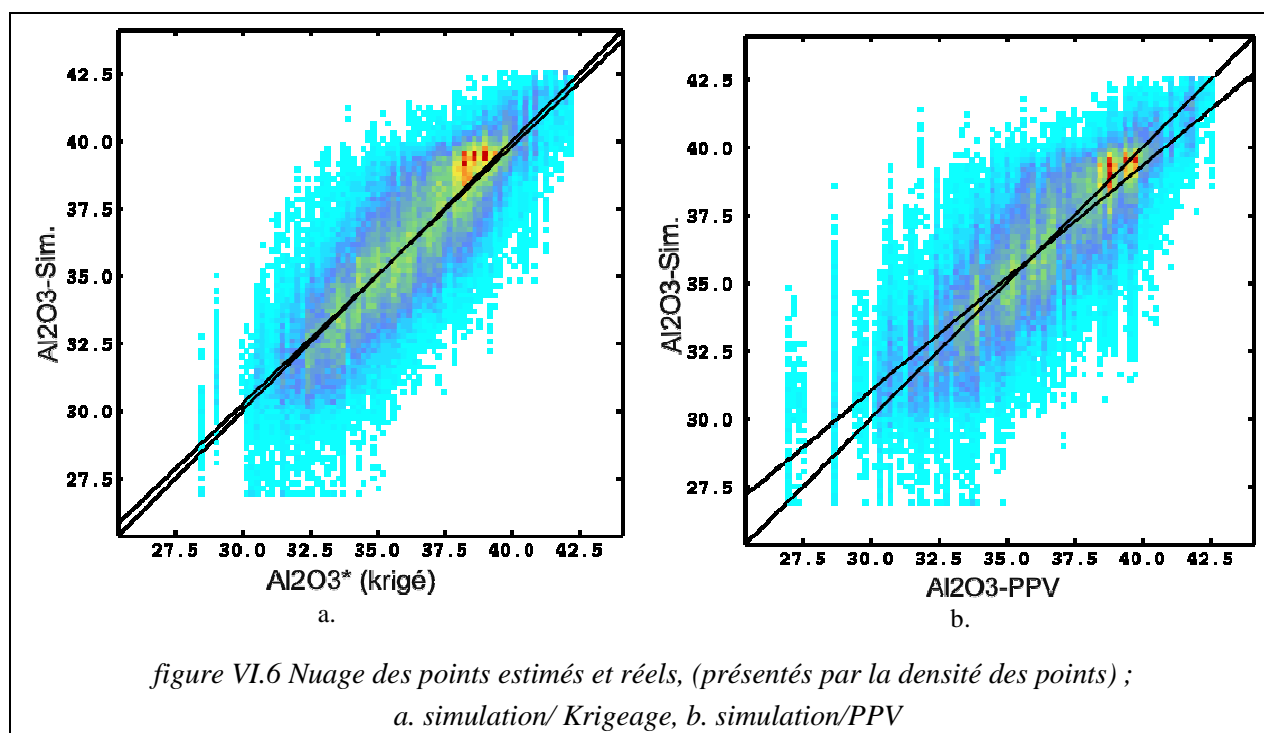
Tableau VI.3 Ecart-type de la teneur simulée des sous-blocs dans chaque classe (BDR-NE).

VClass	Ecart-type d' Al_2O_3									
	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim5	Sim6	Sim7	Sim8	Sim9	Sim10
]30	2.015	2.130	1.834	2.118	2.151	2.015	2.130	1.834	2.118	2.151
[30,34[	2.050	1.977	1.979	1.928	2.064	2.050	1.977	1.979	1.928	2.064
[34,37[	1.967	1.956	1.885	1.975	1.936	1.967	1.956	1.885	1.975	1.936
[37,40[	1.639	1.711	1.654	1.614	1.654	1.639	1.711	1.654	1.614	1.654
[40,42[	1.244	1.430	1.211	1.248	1.424	1.244	1.430	1.211	1.248	1.424
[42,44[	0.770	0.924	0.953	0.880	0.663	0.770	0.924	0.953	0.880	0.663

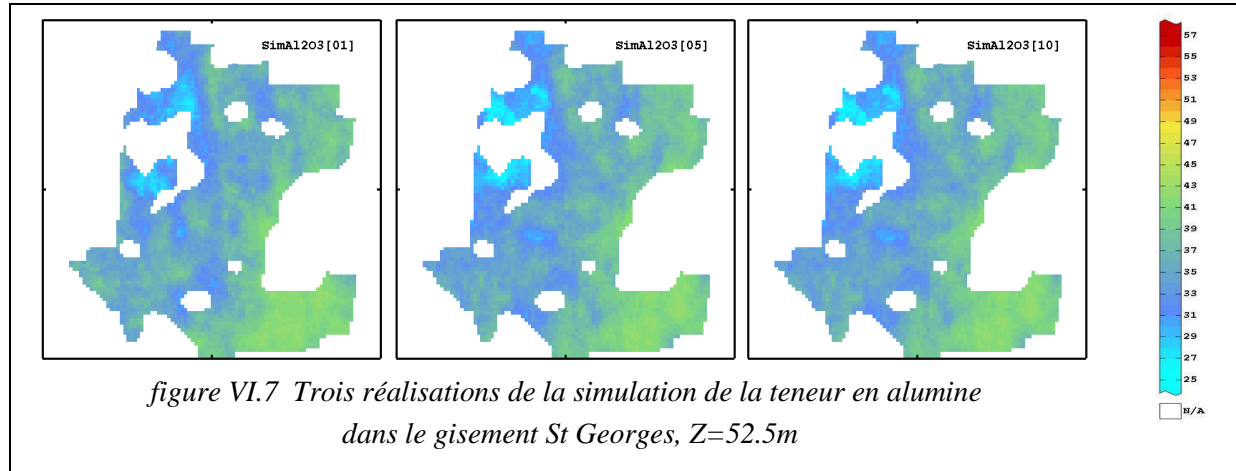
KClass	Ecart-type d' Al_2O_3									
	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim5	Sim6	Sim7	Sim8	Sim9	Sim10
]30	1.698	1.464	1.685	1.948	1.805	1.698	1.464	1.685	1.948	1.805
[30,34[	1.937	1.886	1.828	1.815	1.957	1.937	1.886	1.828	1.815	1.957
[34,37[	1.931	1.964	1.871	1.942	1.898	1.931	1.964	1.871	1.942	1.898
[37,40[	1.544	1.572	1.519	1.544	1.562	1.544	1.572	1.519	1.544	1.562
[40,42[	1.365	1.321	1.042	1.239	1.534	1.365	1.321	1.042	1.239	1.534
[42,44[	0.720	0.708	0.611	1.004	0.608	0.720	0.708	0.611	1.004	0.608

Le nuage de points présenté par la densité des points dans la figure VI.6 montre la relation entre les valeurs d'une réalisation de la simulation sur les sous-blocs et les valeurs des critères, c'est-à-dire les valeurs krigées sur les blocs, et les valeurs des sous blocs interpolés par le PPV. Le coefficient de corrélation pour le krigage est 0.83 et pour le PPV est 0.80, La pente de régression pour le krigage s'approche à 1 (0.95) et l'ordonnée de l'origine est égale à 1.53. Pour le PPV, la pente de régression est 0.83 et l'ordonnée à l'origine est égale à 6.02.

Finalement on compare trois réalisations de la simulation (1, 5 et 10). La moyenne de la teneur pour les trois simulations est égale à 36.04, 36.00 et 36.00% en Al_2O_3 , et les écart-types sont 2.89, 2.85 et 2.85, cela montre la stabilité du système de la simulation.



La contraction des stocks ciblés (tas par classe d'alumine) réduit la variation de la teneur des entrées à l'usine, mais elle ne peut pas toujours assurer le respect envers les limites et les spécifications souhaitées. La baisse de la variation des matières extraites d'un tas dépendra de la variation de la teneur à l'intérieur du tas et aussi de la méthode d'homogénéisation et de l'échelle de l'étude de l'homogénéité (relation variance-volume).

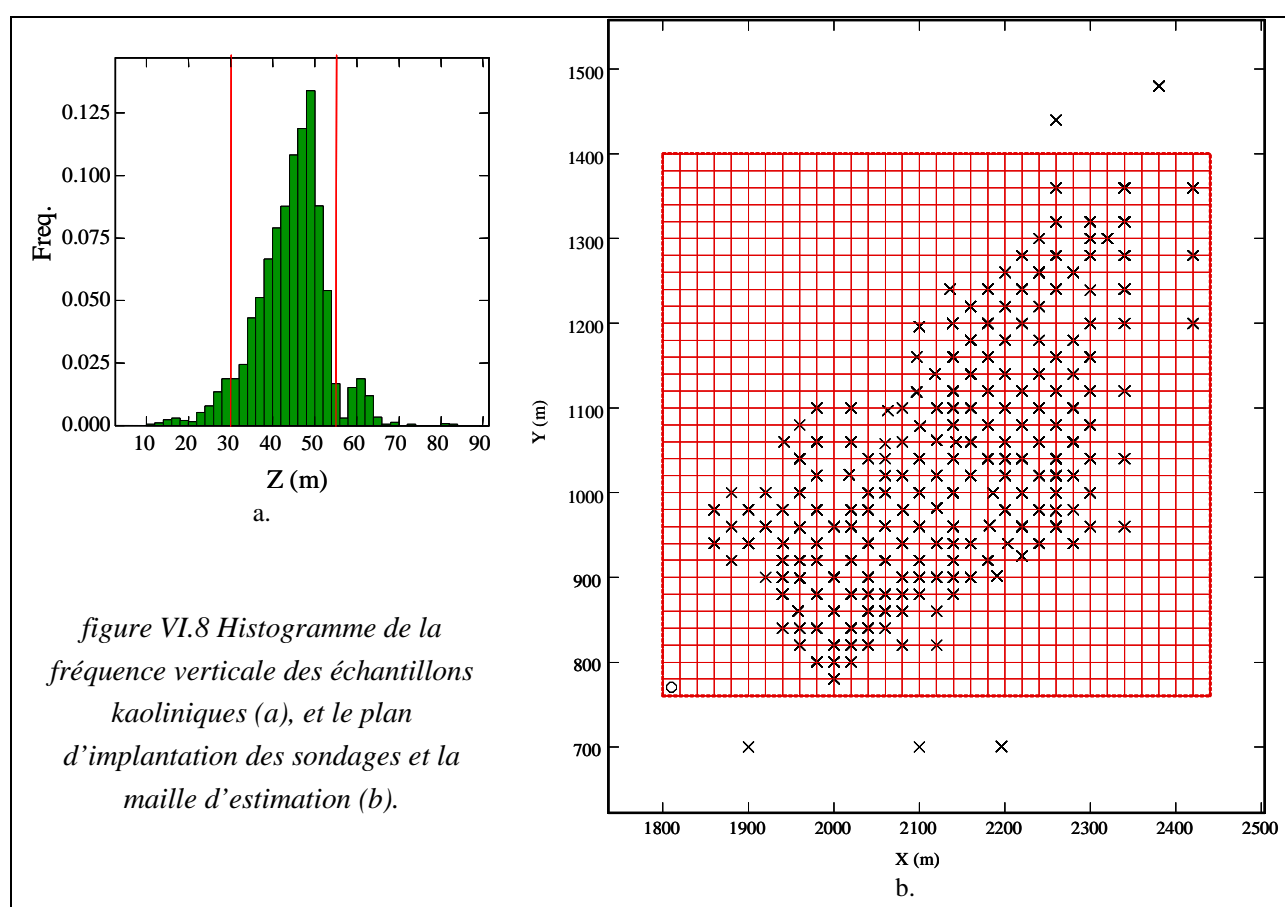


On conclut à l'efficacité du krigeage comme critère de classification des réserves en comparaison avec la méthode du plus proche voisin. Bien évidemment la question des réserves récupérables n'est pas dans le domaine de la géostatistique linéaire et fait appel aux techniques de la géostatistique non-linéaire. Cette étude a été réalisée pour montrer le bénéfice de l'utilisation des valeurs krigées à la place des valeurs de l'échantillon plus proche.

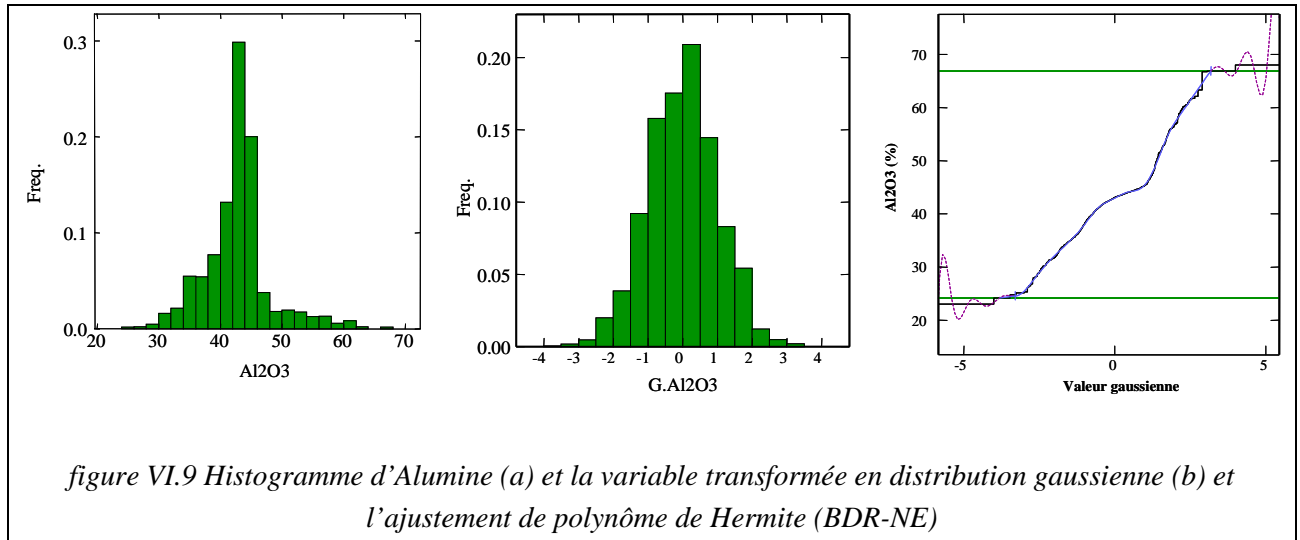
VI.2.3. Etude sur le gisement BDR-NE

Cette gisement sera exploité dans l'année à venir, l'étude du choix de la maille du sondage montre que la maille actuelle des sondages n'est pas suffisante pour évaluer ce gisement vu la complexité du gisement et la présence d'écart important de la teneur en alumine et en potasse des lithologies existantes (voir chapitre précédant). Dans ce contexte la variance d'estimation est très élevée, donc le krigeage devient moins précis. Ce fait se manifeste dans la différence importante des réalisations de la simulation de la teneur en alumine.

Pour réduire le temps de calcul, la simulation sera faite sur les tranches d'une épaisseur d'un demi mètre, de $z=30\text{m}$ à $z=54.5\text{m}$. La figure VI.8 montre l'histogramme de l'alumine et l'histogramme de leurs transformés gaussiennes. L'anamorphose sera faite à l'aide des polynômes de Hermite, l'ajustement de polynôme est présenté dans la figure VI.9.



La moyenne de la teneur en alumine est égale à 42.77% et son écart-type s'élève à 5.37%. La teneur minimale est 24.20% et le maximum atteint à 66.90 %. La valeur transformée ($G.\text{Al}_2\text{O}_3$) est une distribution gaussienne normale ($N(0,1)$) le minimum est -3.82 et 3.18 est le maximum.



Pour le krigeage, on a besoin du modèle du variogramme de l'alumine. L'estimation de l'indicateur du kaolin sera utilisée comme un contrôle sur l'estimation de la teneur. Une estimation préalable de l'indicateur en tant que la portion du kaolin dans chaque bloc, permettra de filtrer les zones de stérile. La simulation de la teneur est effectuée seulement sur les blocs ayant une indicatrice estimée plus grande ou égale à 0.5.

Le modèle du variogramme d' Al_2O_3 est exprimé par les équations suivantes, le variogramme horizontal (H) et le variogramme vertical (V). Le variogramme expérimental horizontal est un variogramme moyen calculé avec une tolérance angulaire de 90° et une demie-hauteur de tranche de 0.25 (Les données sont découpées à une longueur de 0.5m).

$$\begin{cases} \gamma_H(h) = 16 * Sph.(h / 40) + 6 * Sph.(h / 400) + 6.15 * Lin.(h / 400) \\ \gamma_V(h) = 16 * Sph.(h / 1.5) + 6 * Sph.(h / 6) + 6.15 * Lin.(h / 4.5) \end{cases}$$

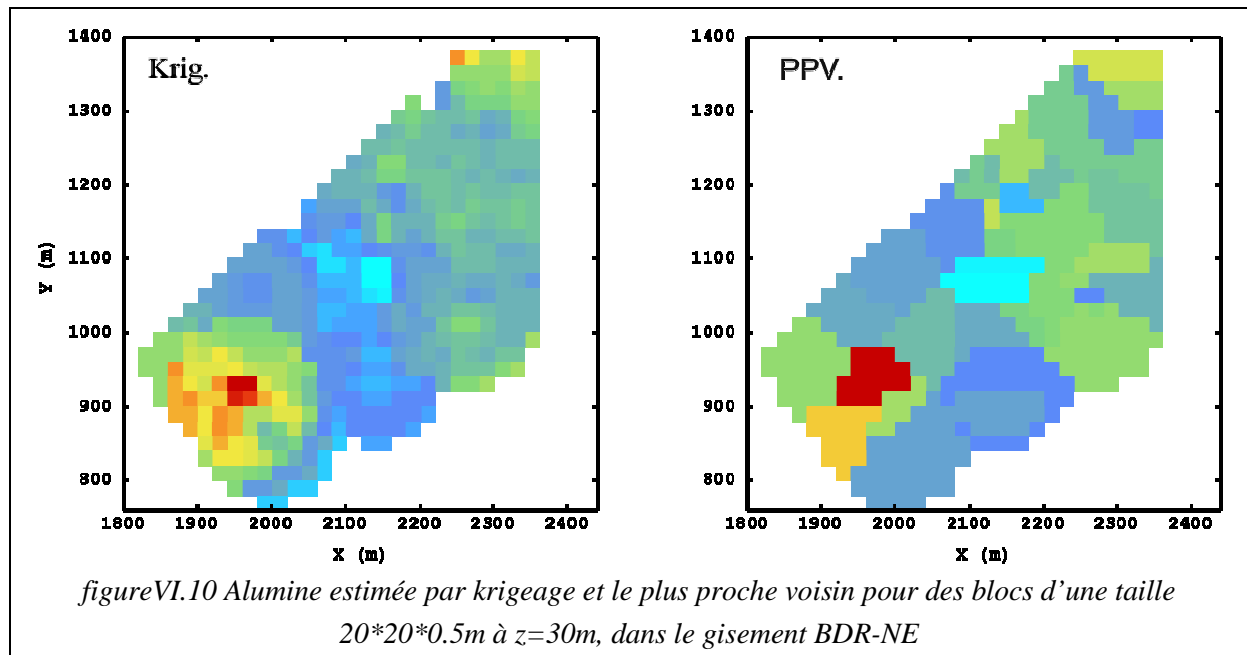
L'anisotropie zonale est modélisée à l'aide d'une structure linéaire représentant 22% de la variance totale. La première structure est la plus importante : la portée témoigne d'une courte distance d'auto-corrélation entre les données.

La modélisation du variogramme de l'indicateur se révèle plus difficile. La différence entre la forme du variogramme vertical (expérimental) et celle du variogramme horizontal est importante. Une partie de ce problème vient de la méthode de régularisation d'une part et d'autre part a des racines dans la nature géométrique des lentilles d'argile. La modélisation est faite en misant en avance l'ajustement plus précis pour les premiers pas du variogramme en tenant compte d'un voisinage logique pour l'estimation. Il y a un effet de pépité apparent (la valeur du premier pas du variogramme horizontal est élevée), mais le gisement est continue comme l'indique d'ailleurs le variogramme verticale. On remplace l'effet de pépité apparent par une structure continue de courte portée.

$$\begin{cases} \gamma_H(h) = 10^{-3} * (90 * Sph.(h / 10) + 70 * Sph.(h / 30) + 47 * Sph.(h / 180) + 30 * Sph.(h / 400)) \\ \gamma_V(h) = 10^{-3} * (90 * Sph.(h / 1) + 70 * Sph.(h / 4) + 47 * Sph.(h / 8) + 30 * Sph.(h / 10)) \end{cases}$$

La figure VI.10 montre le résultat de l'estimation de l'alumine par krigeage et par la méthode de voisin plus proche pour $Z=30m$.

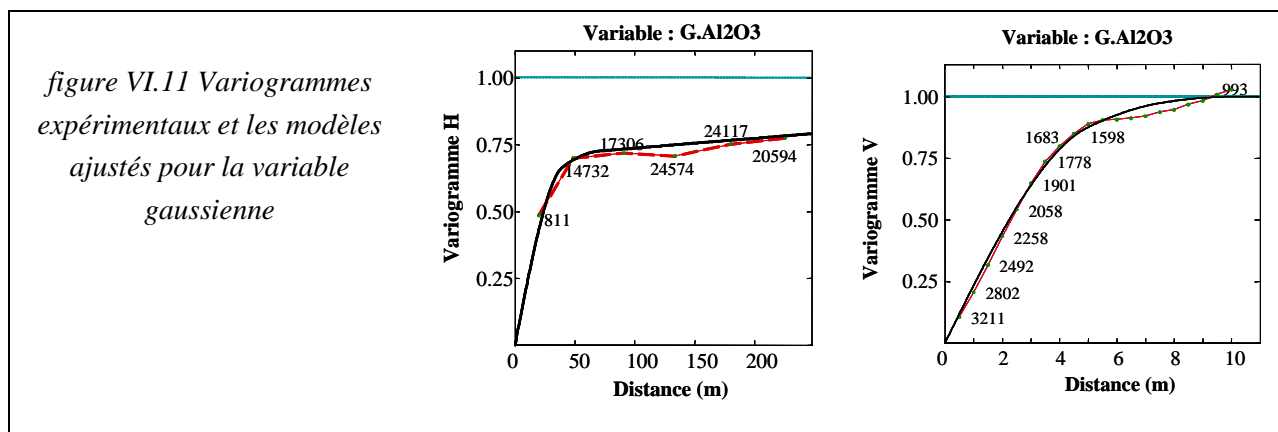
Le coefficient de corrélation entre les deux variables (estimées par ces deux méthodes) est 0.68, le minimum de la teneur estimée par le krigeage est 31.56 % et son maximum est 61.23. L'écart-type des valeurs estimées par le krigeage est sensiblement moins important que celui des valeurs estimées par le PPV. L'écart-type des valeurs estimées par le krigeage est 3.16 tandis que cette écart-type pour PPV est 5.10 qui est plus proche à l'écart-type des données de départ. La différence de l'écart-type de PPV et des données vient du fait que les échantillons n'ont pas même poids volumique, car la maille des sondages n'est pas tout à fait régulière. On constate que le palier du variogramme est plus proche de cette variance pondérée.



La ligne de régression des valeurs krigées sur les valeurs estimées par PPV, montre une pente très faible et égale à 0.42 avec une ordonnée à l'origine très importante qui est égale à 24.83. Cela montre une différence non négligeable entre les résultats des deux méthodes d'estimation (voir figure VI.14).

La méthode des bandes tournantes est une méthode classique utilisée pour la simulation géostatistique. Le modèle du variogramme de variable gaussien est présenté par l'équation suivante (figure VI.11) :

$$\begin{cases} \gamma_H(h) = 0.5 * Sph.(h / 40) + 0.2 * Sph.(h / 70) + 0.3 * Sph.(h / 1200) \\ \gamma_V(h) = 0.3 * Sph.(h / 5) + 0.2 * Sph.(h / 7.5) + 0.3 * Sph.(h / 10) \end{cases}$$

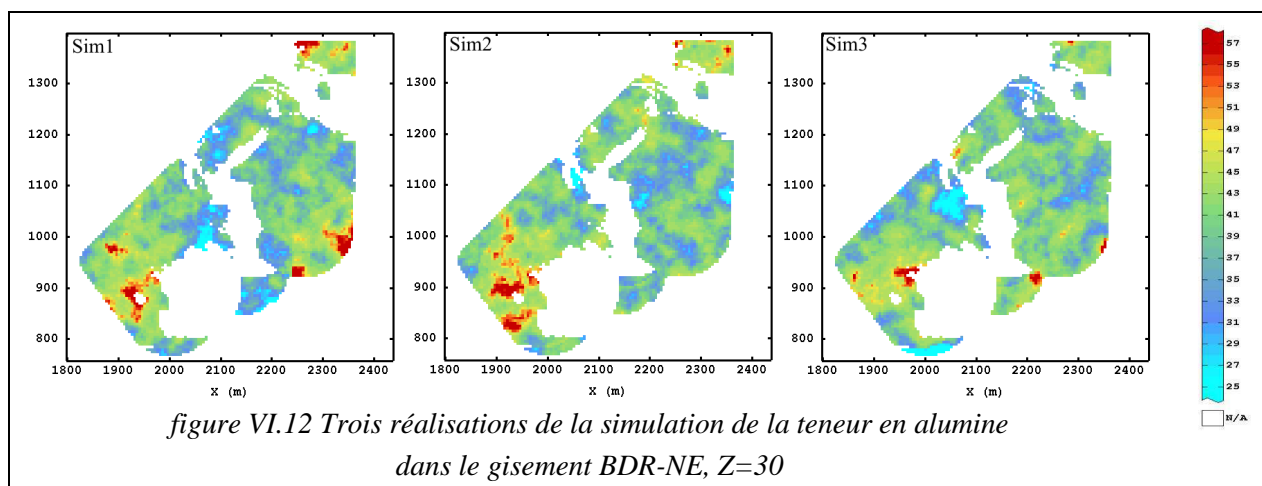


La forme du variogramme expérimental des variables gaussiennes calculé le long des sondages n'est pas très différente avec celle du variogramme expérimental des données brutes. On constate une amélioration de la structure pour le premier pas du variogramme horizontal. Le modèle choisi est un modèle stationnaire anisotrope.

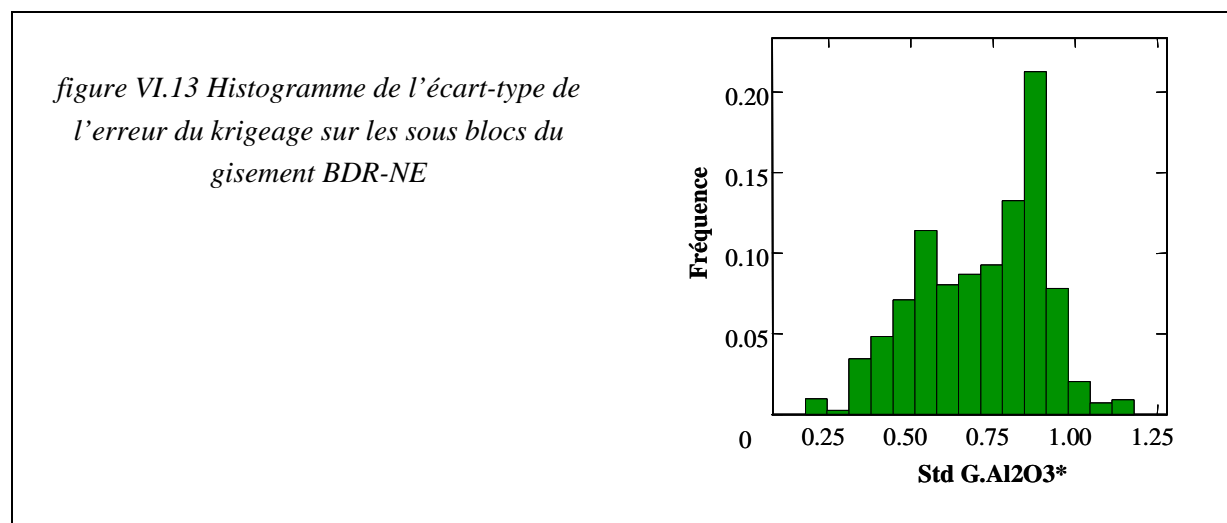
La simulation conditionnelle, sera construite pour des blocs d'une taille de 5*5*0.5m. Chaque bloc utilisé pour l'estimation sera divisé en 16 sous-blocs. Pour souci du temps de calcul « 500 bandes tournantes » sont utilisées pour la simulation et 10 réalisations sont produites. La figure VI.12 présente le résultat de la simulation pour les trois premières réalisations. Les zones blanches sont composées des blocs ayant une indicatrice estimée à moins de 0.5 ou sont situés à l'extérieur d'un polygone limitant le gisement.

On constate une ressemblance générale, entre les résultats de ces réalisations, qui vient du conditionnement de la simulation, du respect de la covariance et de la distribution des données.

Les images de ces trois réalisations ne se correspondent pas exactement pixel par pixel, cette différence provient du modèle du variogramme et de la géométrie des données, car comme on le sait la valeur simulée se compose de la valeur krigée plus d'une simulation de l'erreur d'estimation. L'erreur d'estimation est liée à l'écart-type de l'erreur de krigeage sur la cible (point/bloc).



La figure VI.13 montre l'histogramme de l'erreur d'estimation de la variable gaussienne sur les sous-blocs du gisement BDR-NE.

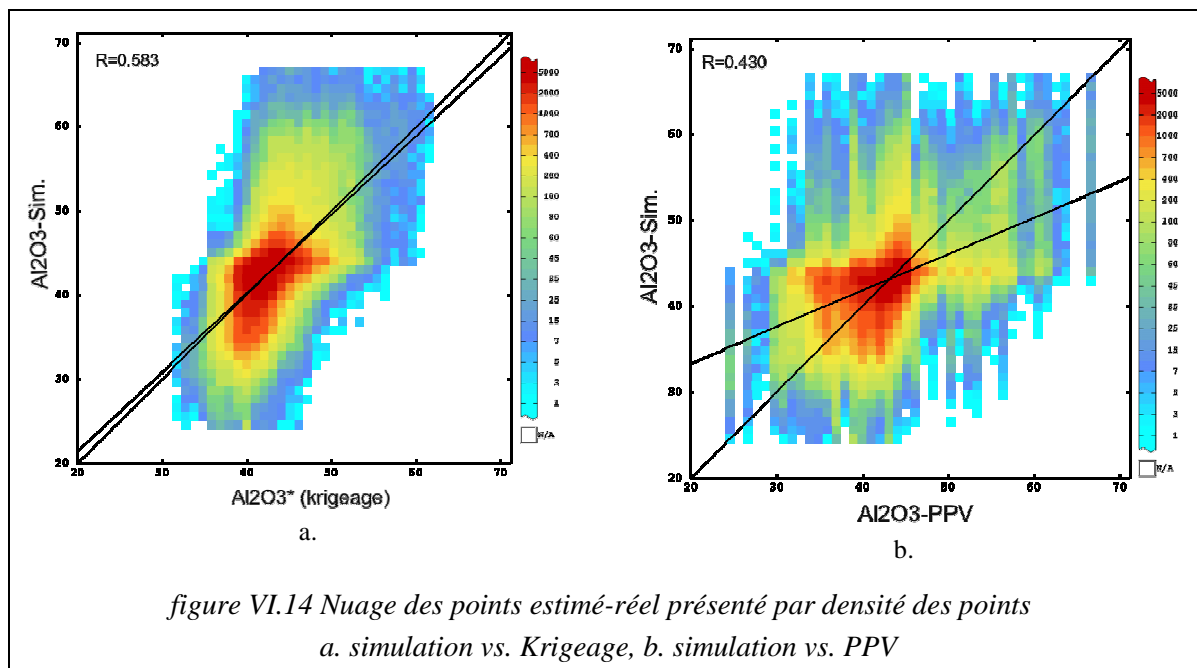


Pour chaque sous-bloc, on peut calculer la valeur des données les plus proches, de la même façon la valeur krigée pour un bloc peut être transférée à ces sous ensembles (sous-blocs). De cette manière on aura la possibilité d'étudier l'impact de la méthode sur la classification des réserves.

On essaie ici, d'élucider le problème à l'aide d'un exemple, imaginons que la teneur moyenne d'un bloc a été estimée à 41% d'alumine, si l'échantillon central a seulement 39% d'alumine, et si on prend la valeur de l'échantillon central comme critère de la classification, tous les sous-blocs exploitables de ce bloc seront envoyés au tas "37-40", tandis qu'en utilisant la valeur krigée, ils seront envoyés au tas "40-42". On sait que la moyenne de chacun des sous-blocs ne sera pas exactement à 39%, ni à 41%. Il est probable que l'on aura des sous blocs moins riches (à 38% par exemple) ou plus riches (à 42% par exemple). La question est comment peut-on quantifier l'impact sur le critère de choix. On se concentre ici, seulement sur les deux premiers moments, c'est-à-dire la moyenne et la variance (ou l'écart-type). L'écart de la moyenne totale de chaque tas à sa moyenne prévue présente le biais causé par le critère de choix. On note ici, que cela ne veut pas dire que chaque partie du dépôt ait la même teneur que la teneur moyenne, et la différence entre chaque partie de tas avec la moyenne du tas dépendra du processus d'homogénéisation et de la construction du tas. Un autre facteur important est la variation des éléments utilisés pour réaliser le tas. Il est évident que si la variation initiale entre les sous blocs est peu importante, le tas sera plus homogène.

On calculera la variance des sous blocs pour chaque classe de réserve.

La qualité d'estimateur peut être présentée à l'aide du nuage de dispersion des valeurs estimées par rapport aux valeurs réelles (simulées) des sous-blocs. Chaque réalisation de la simulation peut présenter une répartition éventuelle de la teneur à l'intérieur du gisement. La figure VI.14 présente les nuages de la dispersion des valeurs estimées sur les résultats de la simulation (réalisation 1). Vu le nombre très élevé des points, on présente les graphes par densité de points.



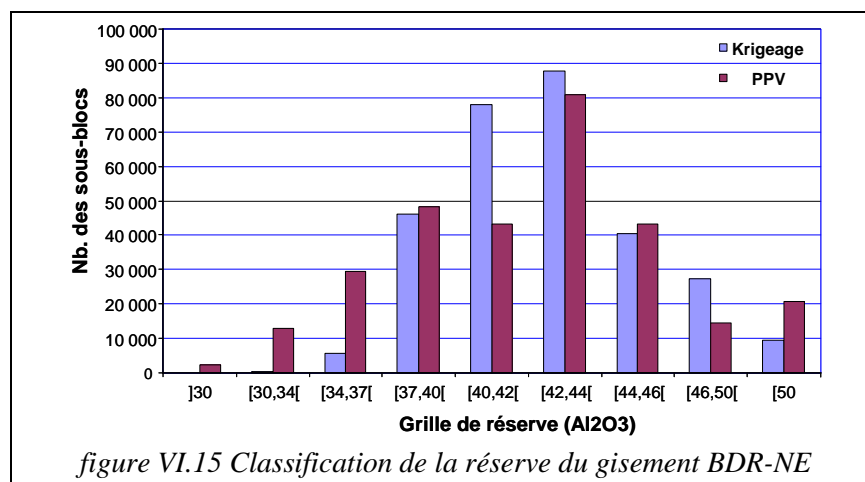
Le coefficient de corrélation pour le krigage est 0.58 et pour le PPV est de 0.43, La pente de régression est très proche de 1. Le krigage donne un meilleur résultat que le PPV. Malgré la pente de régression de 0.94 et une faible ordonnée à l'origine à 2.7, la dispersion très importante des points au tour de la ligne de régression met en question l'exactitude du krigage. Ce problème a été signalé par l'écart-type très élevé de l'erreur d'estimation présenté dans la figure VI.13.

Le Tableau VI.4 compare les effectifs des sous blocs classés dans les différentes classes en utilisant la méthode du krigeage (KClass) et la méthode du plus proche voisin (VClass). En utilisant la valeur krigée comme le critère de classification, aucun sous bloc ne sera envoyé au tas de -30%, tandis que 2077 sous blocs (sur 295174) sont classé -30% par la méthode du PPV. Le krigeage a tendance à lisser les données. Cela provient d'une part du comportement d'une moyenne pondérée comme le krigeage. Cela coïncide avec le fait que la distribution de la teneur des blocs est moins dispersée que la distribution de la teneur des données ponctuelles.

Tableau VI.4 Comparaison des effectifs des sous blocs classé par le krigeage et le PPV, (BDR-NE)

Teneur	VClass									Somme
KClass	]30	[30,34[	[34,37[	[37,40[	[40,42[	[42,44[	[44,46[	[46,50[	[50	
]30										0
[30,34[	286	108	43	7	4	3	2			453
[34,37[	476	1682	2414	742	103	100	31	1	1	5550
[37,40[	656	5401	11957	14302	7440	5317	820	84	109	46086
[40,42[	390	3668	8377	18711	18716	22123	5209	615	304	78113
[42,44[	151	1337	3855	9166	12425	38327	18551	2930	1080	87822
[44,46[	118	337	1305	2752	2678	9695	14383	5957	3147	40372
[46,50[		229	1200	2079	1440	4921	3886	4608	9013	27376
[50		6	317	543	309	465	510	372	6880	9402
Somme	2077	12768	29468	48302	43115	80951	43392	14567	20534	295174

Donc on aura moins de valeurs très grandes ou très petites. La classe 42-44 est citée par les deux méthodes comme la classe la plus fréquente dans le gisement. Un sous bloc classé +50 et un autre classé 46-50 sont rangés dans la grille 34-37 de KClass, cela n'a rien d'étonnant car il n'est pas impossible d'observer des passages rapides dans le gisement, donc une chute importante de la teneur. La figure VI.15 résume la classification des réserves par ces méthodes.



Le Tableau VI.5 analyse la moyenne de la teneur simulée des sous-blocs dans chaque classe. Le premier tableau est le résultat du calcul de la moyenne de chaque classe en utilisant la valeur PPV comme critère de sélection sur 10 simulations réalisées. Le deuxième tableau présente la même chose mais en prenant la valeur du krigeage comme critère de sélection. La cellule en jaune présente les cas où la moyenne calculée dépasse les limites de classe. On constate que le critère imposé par le krigeage est plus efficace du point de vue du respect à la moyenne.

Il ne faut pas confondre le krigeage avec la simulation, mais en même temps on utilise le krigeage pour produire un des éléments de la simulation. L'erreur d'estimation est orthogonale avec la valeur

estimée, elles sont donc indépendantes. Sa grandeur est définie par le vecteur aléatoire gaussien et l'écart type de l'erreur de krigeage.

De la même manière, le calcul de la moyenne et de l'écart-type de chaque classe est défini. Ce deuxième moment nous fournit des informations sur la dispersion de la teneur des blocs arrangés sous chaque classe de réserves, en sachant que les matériaux des tas ne subiront pas de processus de mélange très avancé, et que le processus est identique pour toutes les classes. La variation initiale joue un rôle important sur la dispersion de la teneur à l'intérieur du tas aussi.

Les résultats présentés peuvent être résumés de la façon suivante ;

- La maille de sondage est trop large pour évaluer le gisement en tenant compte la variabilité très importante de la teneur
- La géométrie des données et l'auto-corrélation faible entre les données ne sont pas favorables à une estimation assez précise par le krigeage, cela est vrai encore plus pour la méthode de PPV.
- La simulation des sous-blocs nous permet de produire des répartitions éventuelles de la teneur à l'intérieur du gisement.
- Le krigeage donne des résultats plus corrélés avec les valeurs simulées que le résultat de PPV.
- L'utilisation de valeur krigées permet une classification des réserves qui, en moyenne, respecte plus les limites de classe et dans la plus part des cas est plus exacte.

Le Tableau VI.6 présente l'écart-type de la teneur des sous-blocs classés par les deux critères. On constate que dans la plus part des cas, c'est le critère basé sur le krigeage qui donne un écart- type moins important (les cellules colorées en jaune).

Tableau VI.5 Moyenne de la teneur simulée des sous-blocs dans chaque classe (BDR-NE).

VClass	Moyenne d'Al ₂ O ₃									
	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim5	Sim6	Sim7	Sim8	Sim9	Sim10
]30	36.20	36.48	36.97	37.15	38.21	38.09	36.64	35.15	37.55	39.54
[30,34[	40.07	39.52	39.17	39.27	40.43	38.00	39.64	39.17	38.42	38.99
[34,37[	40.66	39.93	39.38	40.12	40.51	39.96	39.82	39.43	40.34	39.62
[37,40[	41.09	41.16	40.28	40.69	40.98	41.00	40.42	40.09	40.29	40.52
[40,42[	41.37	41.36	40.81	41.21	41.43	40.92	41.06	40.89	41.07	40.72
[42,44[	42.66	42.51	42.36	42.48	42.63	42.51	42.48	41.98	42.69	42.31
[44,46[	44.82	44.69	44.38	44.49	44.36	44.52	44.34	43.68	44.49	44.08
[46,50[	45.32	45.89	45.65	45.92	45.57	46.09	45.51	45.04	45.84	45.34
[50	48.36	48.53	47.90	48.02	48.50	48.29	49.46	47.87	49.16	47.74

KClass	Moyenne d'Al ₂ O ₃									
	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim5	Sim6	Sim7	Sim8	Sim9	Sim10
]30										
[30,34[	33.05	30.77	34.35	32.60	34.30	35.58	33.12	30.87	33.43	34.12
[34,37[	36.24	36.37	35.13	36.56	37.19	35.84	36.22	35.76	36.62	36.90
[37,40[	38.90	38.82	38.30	38.82	39.49	38.79	39.02	38.56	38.81	38.53
[40,42[	41.21	41.01	40.62	40.85	41.19	40.80	40.79	40.37	40.83	40.63
[42,44[	43.19	42.99	42.76	42.89	42.85	42.89	42.70	42.49	42.79	42.60
[44,46[	44.86	45.26	44.49	44.81	44.80	44.77	44.81	43.96	44.69	44.39
[46,50[	47.11	46.82	46.38	46.55	46.47	46.83	46.52	45.43	47.07	45.98
[50	51.41	51.26	50.64	51.01	51.73	50.67	51.71	50.48	52.11	50.76

Les résultats présentés peuvent être résumés de la façon suivante ;

- La maille de sondage est trop large pour évaluer le gisement en tenant compte la variabilité très importante de la teneur
- La géométrie des données et l'auto-corrélation faible entre les données ne sont pas favorables à une estimation assez précise par le krigeage, cela est vrai encore plus pour la méthode de PPV.
- La simulation des sous-blocs nous permet de produire des répartitions éventuelles de la teneur à l'intérieur du gisement.
- Le krigeage donne des résultats plus corrélés avec les valeurs simulées que le résultat de PPV.
- L'utilisation de valeur krigées permet une classification des réserves qui, en moyenne, respecte plus les limites de classe et dans la plus part des cas est plus exacte.

Tableau VI.6 Ecart-type de la teneur simulée des sous-blocs dans chaque classe (BDR-NE)

VClass	Ecart-type d'Al ₂ O ₃									
	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim5	Sim6	Sim7	Sim8	Sim9	Sim10
]30	4.85	5.66	5.12	5.26	4.89	5.32	5.61	5.33	4.97	4.89
[30,34[	5.12	4.93	5.51	5.13	5.95	4.90	4.52	4.49	4.84	4.65
[34,37[	5.01	4.77	4.64	4.83	4.77	4.38	4.89	4.74	4.72	4.53
[37,40[	5.06	4.73	4.64	4.66	4.32	4.63	4.33	4.48	4.30	4.27
[40,42[	4.03	3.76	4.21	3.95	3.98	4.19	4.02	3.92	4.35	3.98
[42,44[	4.18	3.88	4.17	4.11	3.78	4.36	4.05	4.16	4.15	4.07
[44,46[	4.37	4.29	3.91	4.51	4.09	4.14	4.21	4.02	4.63	3.96
[46,50[	4.99	4.92	5.10	4.72	5.27	5.11	4.83	4.43	4.74	5.01
[50	6.49	6.69	6.32	6.59	6.67	6.28	7.04	6.46	6.62	6.28

KClass	Ecart-type d'Al ₂ O ₃									
	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4	Sim5	Sim6	Sim7	Sim8	Sim9	Sim10
]30										
[30,34[	3.49	4.13	5.08	4.00	4.60	4.51	4.34	4.45	4.68	4.83
[34,37[	4.97	4.42	4.86	4.35	4.91	4.64	4.77	4.59	4.76	4.14
[37,40[	4.16	4.02	4.59	4.19	4.39	4.30	4.02	4.29	4.27	4.08
[40,42[	3.97	3.57	3.98	3.77	3.88	3.90	3.80	4.03	3.82	3.74
[42,44[	3.74	3.48	3.54	3.91	3.53	3.92	3.66	3.65	3.84	3.61
[44,46[	4.48	4.55	4.01	4.58	4.21	4.34	4.58	4.07	4.34	4.10
[46,50[	5.44	5.57	5.31	5.25	5.10	5.36	6.04	5.17	5.76	5.09
[50	6.47	6.83	6.58	6.63	6.76	6.59	7.39	6.79	6.90	6.53

On a constaté une grande différence entre le résultat de la classification des deux gisements du point de vue de la moyenne des classes. En gros, quand le gisement est simple et bien échantillonné, la méthode du PPV est très proche du krigeage et donne des résultats acceptables, ce qui était le cas des gisements anciens. Mais dans les gisements complexes (structure spatiale faible) et moins connus (maille d'échantillonnage large), le PPV perd de son efficacité, ce qui est le cas des gisements actuels d'AGS.

VI.3. Simulation des variables catégorielles

L'étude de la simulation est faite sur le gisement BDR. Les contacts spatiaux des différentes lithologies sont étudiés, et le regroupement des lithologies est réalisé avec des classes plus larges. Deux séries de simulations sont effectuées sur le gisement. Dans la première simulation la totalité du volume du gisement est étudié, et la deuxième simulation est faite sur la deuxième séquence kaolinique du gisement en utilisant les surfaces du guidage.

La dernière partie de ce chapitre porte sur la simulation de la qualité d'argile, classé sous trois grands groupes.

VI.3.1. Introduction à la simulation des variables catégorielles

La reconstitution du phénomène de sédimentation est réalisable à petite échelle. Cette méthode a quelques limitations concernant la dimension des matières sédimentaires et la simulation des temps caractéristiques des situations réelles dans la nature. On est limité techniquement par les facteurs de contrôle, d'autant plus que tous ces facteurs ne sont pas exactement connus dans un bassin de sédimentation. Ce genre de modèle physique est très utile et intéressant pour acquérir une notion conceptuelle des phénomènes.

La simulation par les modèles mathématique pourra être une alternative intéressante. Pour simplifier le processus, on utilise certains modèles capables d'expliquer une grande partie des variations. Dans ce but, on peut classer les modèles actuels en modèles physiques, et modèles probabilistes.

Pour ce qui concerne les modèles physiques, la modélisation se fait sur la base de lois de comportement physique des phénomènes, décrites sous une forme mathématique. Dans ce contexte un modèle mathématique défini de phénomène sera ajusté aux données. Des études ont aussi été publiées par les chercheurs du centre de géostatistique et du laboratoire de sédimentologie de l'Ecole de Mines de Paris pour la modélisation des ressources dans des contextes géologiques de méandres fluviaux (Lopez 2003, Cojan et al. 2004).

Les méthodes probabilistes sont principalement des méthodes de simulation de faciès lithologique. La méthode utilisée le plus fréquemment est la méthode de simulation séquentielle (Gaussienne ou non gaussienne). La plupart des articles dans ce domaine concernent l'étude géologique dans le secteur pétrolier, où les modèles de sédimentation des couches sont plus réguliers structuellement (verticalement), et aussi plus continus (horizontalement).

Parmi les méthodes développées pour simuler une variable catégorielle comme un faciès, deux modèles sont plus fréquents ; le modèle booléen et le modèle gaussien ou plurigaussien seuillé.

Le modèle booléen correspond à la réunion d'objets implantés au hasard. C'est un modèle très flexible, utilisé principalement quand les objets à simuler ont une interprétation physique ou génétique. Il repose sur des points implantés au hasard (processus de Poisson). En chaque point du processus ponctuel, on plante un objet de taille et de forme fixes ou aléatoires.

Le schéma booléen est un modèle très utilisé pour établir un modèle lithologique de l'architecture interne d'un réservoir pétrolier, que ce soit à l'échelle d'une unité génétique ou à l'échelle granulométrique à l'intérieur de ce dernier. Les proportions des lithofaciès sont les facteurs importants du modèle ; elles fournissent une information sur leur distribution spatiale et constituent un outil très efficace pour déterminer la présence d'une non stationnarité ; cela est un problème important lors de l'application du schéma booléen à la modélisation de réservoirs (Garcia Morales 2003).

Il existe, en parallèle, des modèles descriptifs géologiques pour divers milieux géologiques qu'on peut utiliser pour mieux comprendre les formes et les lois séquentielles de la sédimentation dans chaque

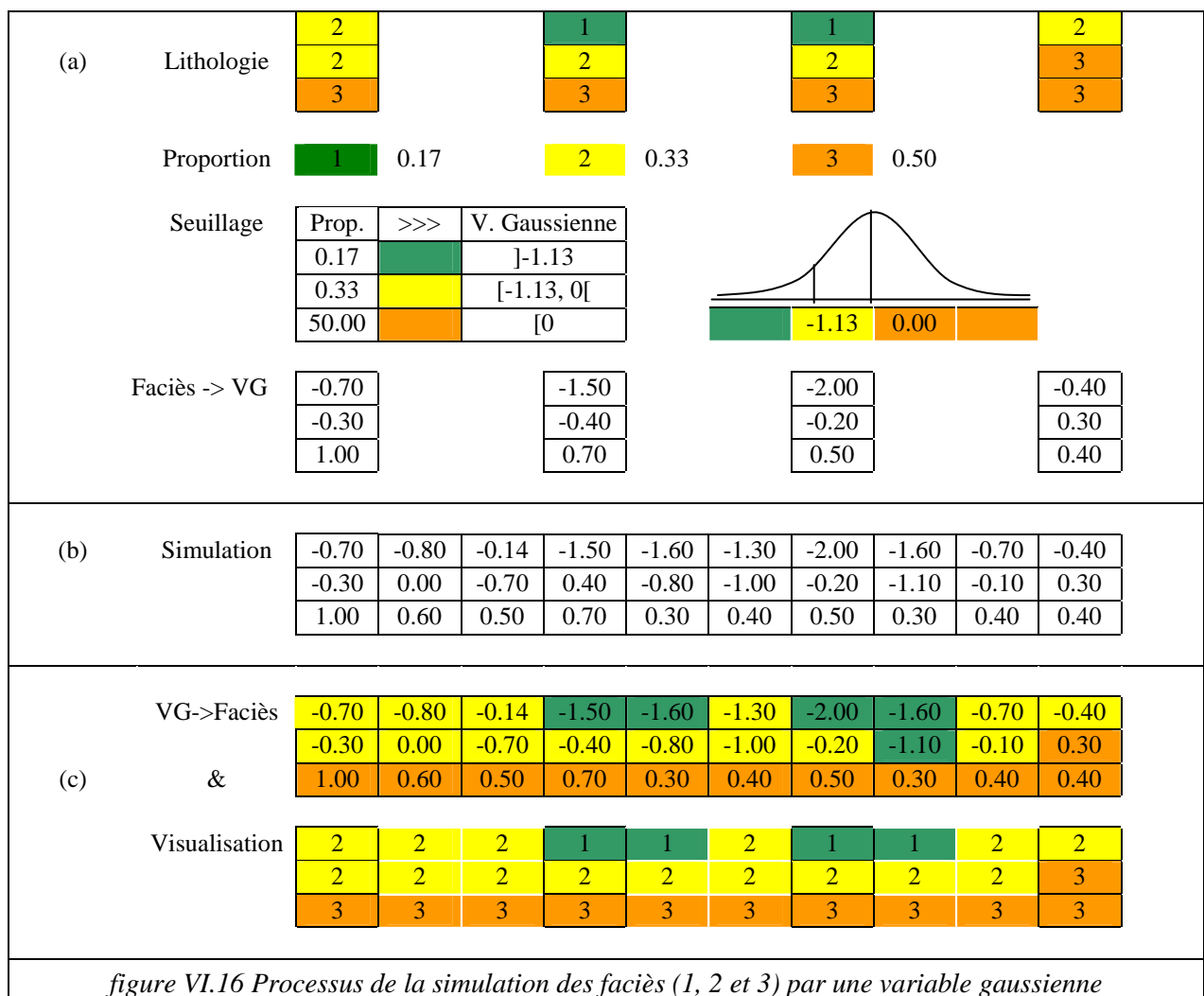
milieu. Ils ne constituent pas des modèles quantitatifs mais sont toutefois d'une aide efficace en complément à d'autres méthodes de modélisation (modèles basés sur une indexation de l'énergie de dépôt).

Dans le cadre de simulation booléenne, il est nécessaire d'avoir la forme et la distribution statistique des facteurs de taille pour créer l'ensemble booléen. Ce n'est pas le cas des gisements kaoliniques des Charentes ; on a donc recours aux méthodes de simulation basées sur le modèle gaussien.

VI.3.2. Modèle des gaussiennes seuillées

La modélisation de faciès lithologiques s'effectue principalement par des gaussiennes ou plurigaussiennes seuillées, par des modèles booléens ou par des méthodes d'indicateurs. Quelque soit le modèle employé, ses caractéristiques sont liées à celles de la fonction catégorielle des faciès (numéro de faciès), ou ce qui revient au même, aux caractéristiques des indicateurs des faciès. (Chilès, 2004)

On essaye ici, d'expliquer le principe de la simulation des faciès à l'aide d'une seule variable gaussienne aléatoire. La simulation des faciès, par la méthode gaussienne seuillée, part d'une simulation d'une variable gaussienne. Dans cette méthode, on utilise la proportion des faciès pour définir les seuils de la variable gaussienne. On remplace chaque faciès par une valeur générée à partir d'une distribution gaussienne, située entre les seuils concernés (figure VI.16.a).



Grâce à la simulation de la variable gaussienne, on est capable de produire des réalisations différentes. La simulation peut être conditionnée par les valeurs gaussiennes assignées aux échantillons (figure VI.16.b).

Une fois qu'on réalise la simulation, on remplace les valeurs gaussiennes par la variable catégorielle (par exemple le code de lithologie, figure VI.16.c).

La simulation plurigaussienne s'effectue de la même manière. L'avantage de la simulation plurigaussienne, est la possibilité d'utiliser plus d'une variable gaussienne. On peut alors appliquer différents schémas de seuillage (figure VI.17)

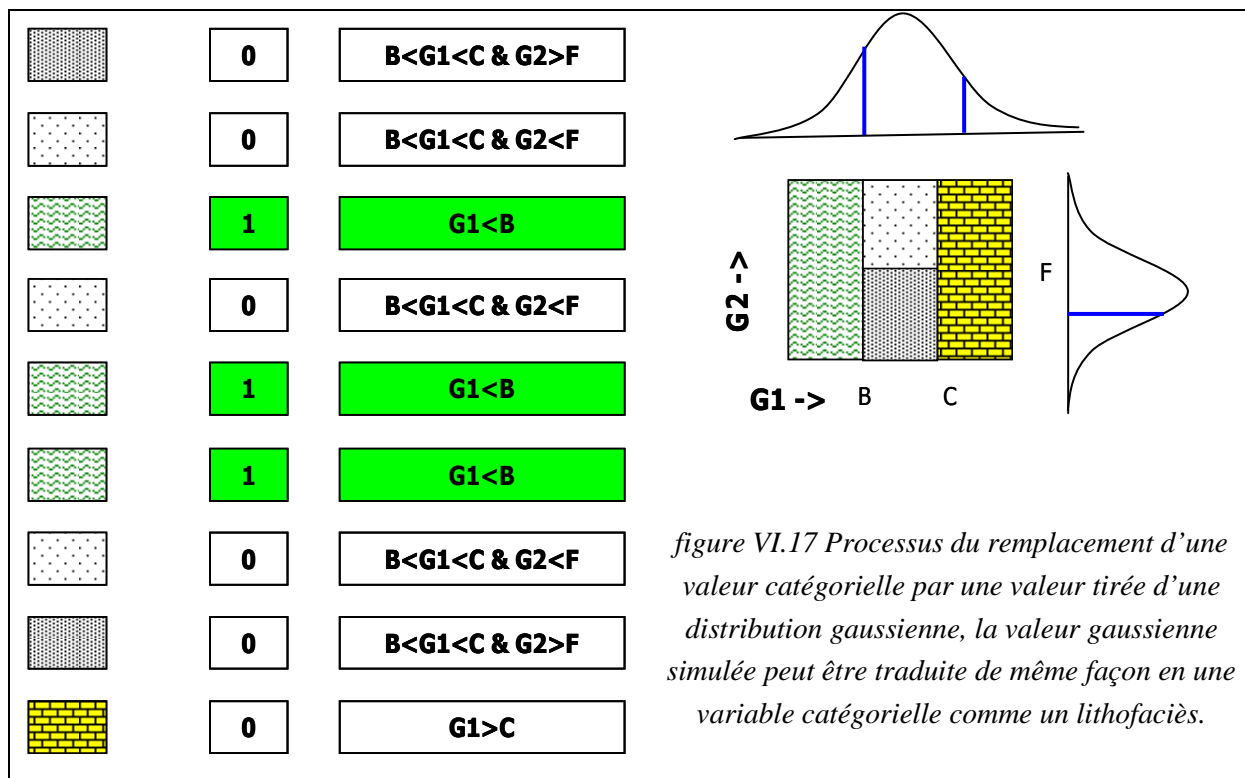


figure VI.17 Processus du remplacement d'une valeur catégorielle par une valeur tirée d'une distribution gaussienne, la valeur gaussienne simulée peut être traduite de même façon en une variable catégorielle comme un lithofaciès.

VI.3.3. Mise en œuvre de la simulation gaussienne

Avant de commencer le calcul des paramètres nécessaires pour la simulation des lithofaciès, il faut d'abord définir les surfaces de référence en s'appuyant sur les interprétations géologiques. L'interpolation géologique peut être basée sur les principes de la stratigraphie séquentielle. L'horizontalisation par rapport à une surface de référence est très appliquée dans les domaines pétroliers, où les unités lithologiques sont plissées mais d'épaisseur régulière. Le niveau de référence peut correspondre à une paléo surface de sédimentation, au toit et au mur d'une couche sédimentaire, etc.

Le choix de la surface de référence a un rôle important, car il influence la géométrie du nouvel espace d'étude.

La simulation se fait selon les étapes suivantes :

VI.3.3.1. Horizontalisation et discrétisation :

Dans cette étape, l'unité à simuler est remise à plat, soit (1) par rapport à une surface de référence (figure VI.18.a), soit (2) par un étirement/compression proportionnel (c'est le cas utilisé dans cette étude). La transformation se fait par verticale, indépendamment d'un sondage à l'autre. Dans le cas (2) l'unité lithologique peut être déformée, compactée ou desserrée (figure VI.18.b). L'horizontalisation est une phase

importante pour la suite des calculs, et le choix de la surface de référence est primordial pour les simulations.

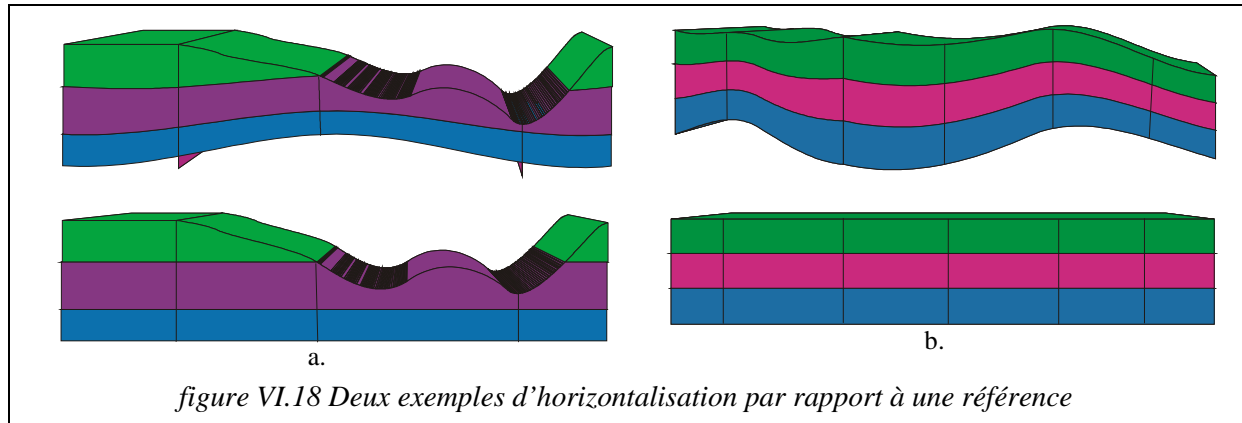


figure VI.18 Deux exemples d'horizontalisation par rapport à une référence

Les faciès physiques sont regroupés en lithotypes, en fonction de leurs propriétés lithologiques pour simplifier les corrélations et aussi pour regrouper les données statistiques. Après horizontalisation, les sondages sont discrétisés à pas régulier et à chaque maille est attribué le faciès correspondant à celui de son centre de gravité. On conserve aussi les proportions des différents faciès dans chacun des échantillons discrétisés.

VI.3.3.2. Calcul des courbes de proportion des lithofaciès :

Les premiers éléments du modèle sont les courbes de proportions, correspondant aux histogrammes cumulés des faciès sur la zone étudiée. La courbe de proportion verticale est une projection des pourcentages de chaque lithofaciès calculé sur une ligne perpendiculaire au niveau de référence et calculé sur toute la zone à simuler. Cette courbe permet de vérifier la stationnarité ou la non stationnarité de la zone d'étude.

Ces courbes de proportions ont un rôle quantitatif, puisqu'elles sont directement utilisées par l'algorithme de simulation, mais aussi un très important rôle qualitatif puisqu'elles permettent de tester et de vérifier globalement les hypothèses et interprétations géologiques, et en particulier le choix de niveau de référence (Doligez et al, 1992).

VI.3.3.3. Calcul du variogramme des faciès et ajustement du modèle du variogramme de la ou des gaussiennes :

L'objectif de l'analyse structurale est de quantifier la variabilité spatiale des lithofaciès en calculant les variogrammes horizontaux et verticaux (simples et croisés de leurs indicatrices). L'ajustement de ces variogrammes se fait indirectement, via le choix d'un modèle de variogramme pour la ou les gaussiennes dont les indicatrices dérivent par seuillage.

VI.3.3.4. Simulation en faciès :

A la fin de l'étape précédente, tous les paramètres sont connus pour pouvoir simuler les lithofaciès sur le volume de l'unité ou du réservoir, c'est à dire informer chaque maille en terme de lithofaciès, de manière à ce que les données aux puits soient respectées, que les courbes de proportions et les variogrammes calculés sur les faciès simulés soient globalement les mêmes que ceux calculés sur les données. Un algorithme utilisant la notion de gaussienne seuillée est utilisé, et permet d'obtenir une série d'images 3D de l'unité étudiée.

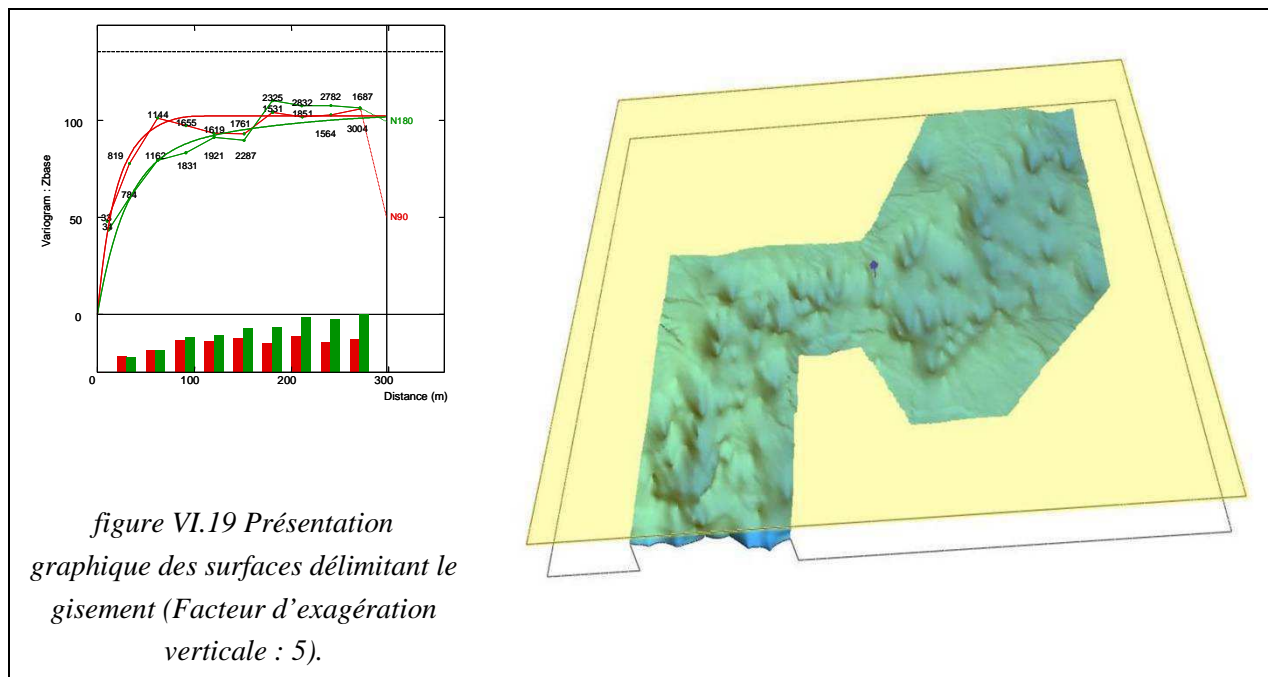
VI.4. Simulation des lithofaciès du gisement BDR

On a effectué deux séries de simulations avec des niveaux de précision différents. La première série a été faite, afin de simuler la totalité de la partie kaolinique du gisement, comprise entre une surface horizontale ayant une altitude de 65m en haut, et une surface représentant la base de la sédimentation en bas. Pour la deuxième série de simulations, on a utilisé une l'interprétation géologique pour encadrer seulement une séquence sédimentaire.

VI.4.1. Délimitation verticale des couches kaoliniques du gisement.

Le but de cette simulation est de préparer une vision générale du gisement, c'est pourquoi une enveloppe assez grande a été choisie pour délimiter du gisement, Le choix d'une surface horizontale comme toit du gisement s'appuie sur le fait que, au fur et à mesure du comblement du gisement la topographie de la base de sédimentation devient plus en plus plate. Selon la figure V.64, la sédimentation importante des couches kaolinique continue jusqu'à une altitude de 65m. Donc la cote de 65m a été choisie pour respecter la stationnarité de proportion des lithofaciès. L'horizontalité de cette surface peut être perturbée par l'érosion de l'argile et la sédimentation de sable. A ce stade, on les considère comme membres de ce système, comme les diluants.

Le choix de la surface de base, est plus critique, parce que normalement on dispose de moins d'information pour la connaître. Le but est de choisir une surface qui représente au mieux la base des dépôts des sédiments. La surface du socle carbonaté peut être le meilleur choix du point de vue de la genèse du gisement, mais les forages atteignant ce socle carbonaté ne sont pas la majorité. La probabilité d'intercepter la partie carbonatée est plus forte quand la surface monte. Par conséquent une estimation basée seulement sur l'altitude de la partie carbonatée dans ces forages tend à produire une surface considérablement au dessous de la réalité, surtout dans les chenaux ou les zones de soutirage carbonaté où se trouvent normalement une partie du gisement. Afin d'aborder ce problème on utilise l'altitude de fin des sondages. L'hypothèse du choix de la fin de sondage correspond à l'appréciation du sondeur d'arriver à la fin de la sédimentation kaolinique. Evidemment, certaines critiques sont acceptables sur ce choix, mais on l'a choisi pour une interprétation rapide et approchée.



Afin de définir cette surface, on l'a estimé par krigeage des points des données sur une grille de 5m*5m. Pour respecter la direction de flux on utilise d'une anisotropie géométrique dans les directions

principales. La forme du variogramme montre l'irrégularité de surface, probablement causée plus par les fins de sondage que par l'irrégularité naturelle de la surface (figure VI.29).

VI.4.2. Analyse statistique des faciès

Les gisements kaoliniques se trouvent dans des sédiments tertiaires ; cette série de sédimentation continentale est connue sous le titre de « faciès sidérolithique ». Elle atteint jusqu'à 110 m d'épaisseur. Les milieux de dépôt de cet ensemble correspondaient à diverses parties d'un vaste système deltaïque subaérien assez mouvant dans le temps avec de nombreux chenaux sableux, des zones de marécages argileux, des milieux palustres [Carte géologique de la France à 1 :50 000, Barbezieux].

Les faciès lithologiques de cette série sédimentaire ont été décrits brièvement dans le tableau II.2. On présente dans le Tableau VI.7, les paramètres statistiques de la longueur des échantillons par classe lithologique.

Tableau VI.7 Longueur des échantillons, et des échantillons assemblés

Lithologie	Echantillons					Echantillons assemblées				
	N	Epaisseur				N	Epaisseur			
		Min.	Max	Moyenne	Ecart type		Min.	Max	Moyenne	Ecart type
0	319	0.1	13.5	1.31	1.99	300	0.1	13.5	1.39	2.16
1	58	3.5	54	40.49	6.76	58	3.5	54	40.49	6.76
2	42	0.5	18	4.42	4.04	42	0.5	18	4.42	4.04
8	28	0.1	4.5	1.05	1.09	23	0.1	4.5	1.27	1.39
10	751	0.1	7	1.13	0.82	635	0.1	11.5	1.34	1.22
11	448	0.5	3	0.71	0.38	434	0.5	3.5	0.74	0.44
12	788	0.5	2	0.83	0.44	693	0.5	6	0.95	0.70
13	445	0.5	6	0.90	0.60	404	0.5	6	0.99	0.77
14	261	0.5	7	0.93	0.66	234	0.5	7.5	1.04	0.98
15	1442	0.5	8.5	1.24	0.64	783	0.5	16	2.29	2.39
16	118	0.5	7	1.57	1.18	93	0.5	10.5	1.99	1.75
17	587	0.5	6.5	1.62	0.69	295	0.5	14	3.23	2.03
71	27	0.5	1.5	0.96	0.36	27	0.5	1.5	0.96	0.36
72	1178	0.1	25	1.88	2.11	589	0.2	25	3.76	3.52
80	17	0.1	0.5	0.35	0.14	17	0.1	0.5	0.35	0.14
81	18	0.1	5.5	0.90	1.29	18	0.1	5.5	0.90	1.29
82	3843	0.2	71	4.22	6.65	2588	0.2	89.5	6.26	8.95
83	492	0.2	15	2.97	2.50	379	0.2	19.5	3.86	3.23
84	6582	0.1	43	1.56	1.61	3082	0.2	43	3.34	3.54
85	2227	0.1	56	1.54	2.56	1491	0.1	56	2.30	3.62
86	1	2.5	2.5	2.50		1	2.5	2.5	2.50	
87	324	0.2	6.3	1.52	1.07	229	0.2	9.8	2.15	1.69
90	199	0.1	2	0.89	0.47	193	0.1	3	0.92	0.55
91	54	0.5	3	1.36	0.48	40	0.5	4.5	1.84	1.07
92	71	0.4	5.5	1.65	1.13	63	0.4	5.5	1.86	1.19
93	24	0.2	2	1.28	0.43	15	0.2	7	2.05	1.66
94	8	0.4	1.5	1.36	0.39	7	0.4	3	1.56	0.76
Total	20352	0.1	71	2.11	4.02	12733	0.1	89.5	3.37	5.69

Simulation des qualités d'argile et des lithofaciès

Tableau VI.8 Effectif des contacts verticaux entre les lithologies (sens d'investigation : vers le bas)

Nom de FACIES	00	01	02	08	10	11	12	13	14	15	16	17	71	72	80	81	82	83	84	85	86	87	90	91	92	93	94	Somme
00 Hors litho	17	0	1	0	27	1	3	3	3	8	1	1	0	1	1	1	67	3	124	20	0	10	2	5	4	0	1	304
01 Stériles 1	0	0	0	0	2	7	0	1	1	19	0	25	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	57
02 Stériles 2	1	0	0	0	10	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
08 Argiles	1	0	0	5	1	0	0	1	0	6	0	1	0	0	0	0	0	0	6	5	0	1	0	1	0	0	0	28
10 Arg très maig	10	0	17	0	116	23	37	27	8	15	6	1	1	11	1	0	49	8	119	250	0	44	0	2	2	0	1	748
11 Arg maigre	0	0	5	0	50	14	85	35	11	20	0	2	0	0	0	0	23	1	123	74	0	2	0	0	0	0	0	445
12 Arg 1/2 G a G	4	0	0	0	55	159	95	84	30	64	3	3	1	0	0	0	24	3	158	103	0	1	0	0	0	0	0	787
13 Arg 1/2 G	1	1	9	0	35	57	103	41	14	116	3	4	2	0	0	0	6	0	24	26	0	2	0	0	0	0	0	444
14 Arg G a G	0	0	1	0	13	26	67	19	27	43	4	14	0	0	0	0	3	0	32	12	0	0	0	0	0	0	0	261
15 Arg grasse	2	0	8	6	37	52	127	142	105	658	60	163	9	0	0	0	3	0	37	28	0	1	0	0	0	0	0	1438
16 Ar.ligniteuse	0	0	0	1	5	0	3	0	1	51	25	1	0	0	0	0	5	1	16	4	0	0	0	0	0	0	0	113
17 Arg.pierreuse	1	0	0	1	3	4	14	16	14	229	1	291	7	0	0	0	0	0	2	2	0	1	0	0	0	0	0	586
71 Indurations	1	0	0	0	1	1	3	0	1	13	0	3	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	26
72 Grisons	1	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	589	0	0	151	0	315	95	0	12	1	0	1	1	0	1176
80 Galets	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	5	0	1	0	0	0	0	0	17
81 Gravieres	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8	6	0	2	0	0	0	0	18
82 Sab grossier	34	0	1	5	99	41	91	27	23	144	5	66	2	120	8	10	1252	129	1252	293	0	35	49	4	17	0	0	3707
83 Sable fin	3	0	0	2	11	6	7	0	4	9	2	8	1	1	0	1	192	113	92	24	0	3	1	0	0	0	0	480
84 Sab peu arg.	42	0	0	5	125	38	96	28	9	34	4	3	0	318	6	5	1450	195	3488	454	1	56	50	1	11	3	0	6422
85 Sab argileux	25	0	0	2	115	19	55	19	9	12	5	0	1	127	1	0	240	28	676	736	0	55	14	4	10	3	0	2156
86 Arg sableuse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
87 Arg déclassée	15	0	0	1	26	0	1	0	1	0	0	0	0	11	0	0	16	1	28	77	0	95	6	20	12	5	3	318
90 Calc massif	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	6
91 Calc tend/rem	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	23	14	1	0	0	41
92 Sab calcaire	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	41	0	8	2	2	58
93 Sab arg.calc.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	2	3	5	9	0	23
94 Arg/elts calc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	1	1	6
Somme	162	1	42	28	749	448	788	445	261	1442	119	587	25	1178	17	17	3483	482	6510	2215	1	324	199	54	71	24	8	19680

Remarque : Le calcul a été effectué sur les données lithologiques régularisées à 0.5m.

Afin d'analyser la continuité verticale des couches, dans la partie droite les échantillons successifs ayant le même code lithologique ont été assemblés. On note une grande variation qui confirme la situation géologique mentionnée ci-dessus.

L'analyse des contacts de différentes lithologies, nous permet d'avoir une notion générale de l'architecture du bassin sédimentaire, On résume les relations verticales des contacts dans les deux tableaux suivants.

Le Tableau VI.8 contient des informations très intéressantes pour l'interprétation de la genèse du gisement. Le Tableau VI.8 montre qu'en descendant dans les sondages, l'argile ligniteuse est suivie plus fréquemment par l'argile grasse (51 fois sur 113 fois, dont 25 fois où on reste dans l'argile ligniteuse). Le Tableau VI.8 donne une information très intéressante sur l'argile pierreuse, au toit de cette argile on trouve plus fréquemment l'argile grasse (163 /587), la continuité verticale de l'argile pierreuse est considérable (291/587). Un autre cas de figure pour l'argile pierreuse est son recouvrement par le sable grossier. Verticalement, l'argile grasse est la lithologie kaolinique la plus continue, dans ce gisement.

Aucun contact direct n'existe entre les argiles kaoliniques de code 11 à 17 avec les lithologies carbonatées. Le contact reste très faible entre les sédiments de régime haut énergie de flux (code 80 et 81) et les argiles kaoliniques. Cela veut dire que la succession des sédiments respecte les règles de l'énergie de flux.

VI.4.3. Analyse statistique des lithotypes du gisement

L'unité encadrée par deux surfaces (la cote de 65 m en haut et la surface de base) est traversée par plus de 500 sondages. On utilise un polygone pour encadrer le gisement. Celui-ci est subdivisé en 18 niveaux. On regroupe les lithologies sous 3 lithotypes (Tableau V.9).

Tableau VI.9 Regroupement des lithologies du gisement sous 3 lithotypes.

Code Faciès	Code Lithotype	Description	Nom Lithotype	Couleur
0, 1,2	1	Stérile couverture	Stérile	Orange
8, 10, 84, 85,86, 96	1	Argiles impures	Stérile	
80-84	1	Sable	Stérile	
11, 12, 13, 14	2	Argile kaolinique + peu de quartz ou mica	Kaolin 11-14	Verte
15, 16,17	3	Argiles kaolinique pures + argile ligniteuse	Kaolin 15-17	Rouge

Le Tableau VI.10 montre les proportions de différents lithotypes ;

Les proportions initiales correspondant aux proportions calculées le long des sondages avant l'horizontalisation et la discrétisation (données brutes).

Les proportions discrétisées correspondent aux proportions calculées après l'horizontalisation et la discrétisation de tous les sondages.

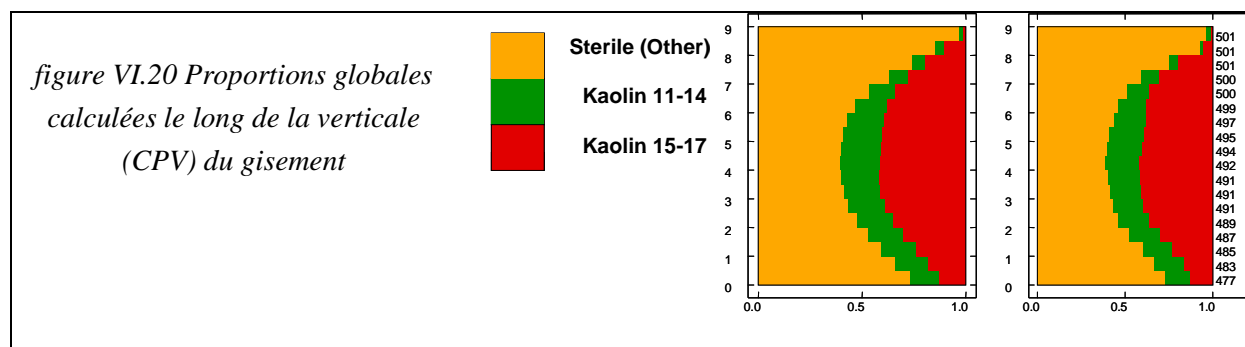
Les proportions assignées correspondent aux proportions affectées au centre de gravité de chaque cellule de la grille de simulation après horizontalisation et discrétisation.

Tableau VI.10 Proportions des lithotypes du gisement

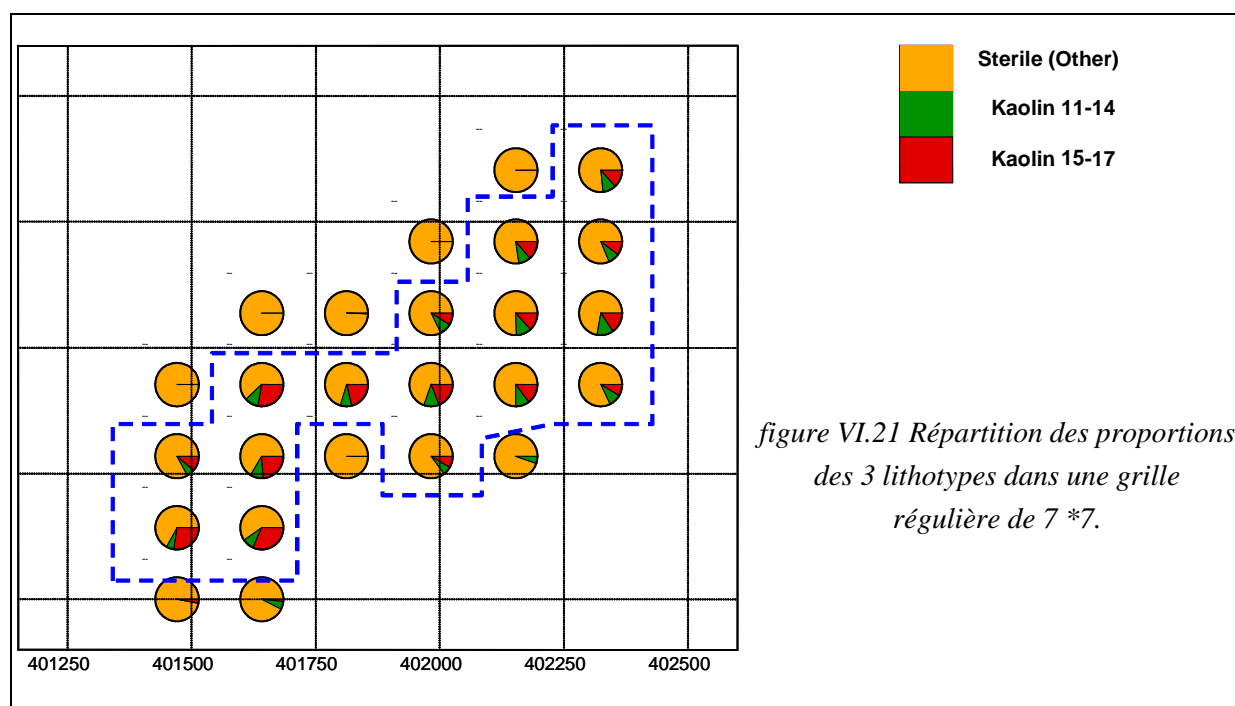
Lithotype	Proportions initiales	Proportions discrétisées	Proportions assignées
1	0.026	0.026	0.026
2	0.306	0.305	0.305
3	0.164	0.163	0.163

La courbe de proportion verticale (CPV) des lithofaciès

La courbe globale de proportion verticale des lithofaciès (figure VI.20) montre une non stationnarité verticale des lithofaciès. On a des stériles (sables) à la base, la proportion d'argiles augmente dans les niveaux intermédiaires, ensuite elle se dégrade en montant vers le haut de la série.



La figure VI.21 représente les proportions de chaque lithotype calculées à la verticale de chaque parcelle (la moyenne des sondages de parcelle). Notons d'abord que la proportion des argiles est très faible dans les parcelles situées en bordure du gisement. Une stationnarité horizontale peut être retenue si on limite le gisement (domaine pointillé sur la figure VI.21). La courbe verticale des proportions des lithofaciès est alors reproduite sur chaque parcelle comme le montre la figure VI.21 (les cellules de cette grille sont beaucoup plus larges que les cellules de la grille finale de simulation).



L'estimation des proportions des lithotypes sur la grille régulière à maille fine a été faite par krigeage en supposant le variogramme linéaire (figure VI.22). On peut comparer les proportions des lithotypes, sur la CPV globale, et celles de la grille d'estimation (240*200*130) à l'aide du Tableau VI.11.

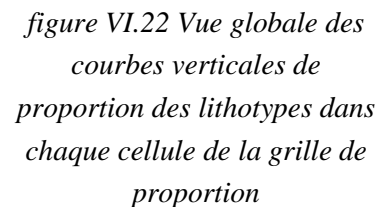
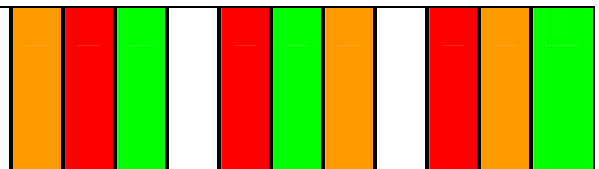


Tableau VI.11 Comparaison des proportions des lithotypes du gisement, sur les CPV

Lithotype	CPV globale	CPV régularisé	CPV calculé sur la grille
1	0.740	0.828	0.884
2	0.085	0.063	0.048
3	0.175	0.109	0.109
Echantillon	130	3250	6240000

VI.4.4. Calcul du variogramme des gaussiennes et ajustement du modèle

La méthode plurigaussienne nécessite la définition de plusieurs fonctions aléatoires gaussiennes sous-jacentes (deux en pratique) en fonction de l'organisation des lithofaciès. Dans cette étude, on utilise deux fonctions aléatoires gaussiennes pour simuler les lithotypes. L'utilisation d'une seule fonction gaussienne impose qu'un des lithotypes soit intermédiaire entre les deux autres (figure VI.23); cela peut être applicable dans le cas des séquences sédimentaires successives, ou de catégories d'un paramètre quantitatif et continu.



VI.4.5. Calcul des variogramme du gisement

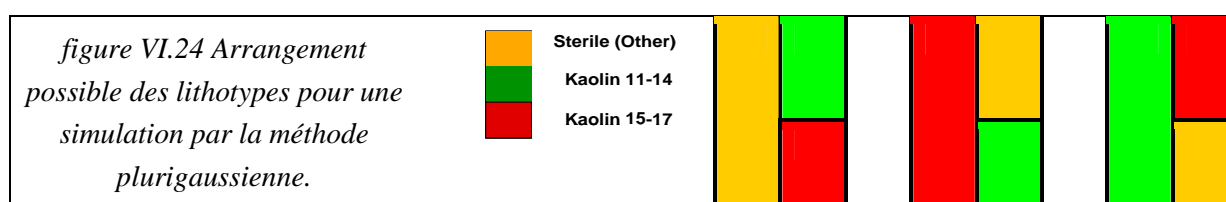
Pour l'unité qui prend la totalité du gisement entre l'altitude de 65m et la surface de base, on a besoin de deux fonctions gaussiennes. Le choix du schéma de seuillage est basé sur la statistique des contacts verticaux, entre lithotypes qui sont ceux présentés dans le Tableau VI.12.

On constate qu'au dessous du stérile on a quasiment la même chance de trouver le kaolin 11-14 ou le kaolin 15-17 (10% et 8%). Le stérile et le kaolin 15-17 n'ont la même probabilité d'être situés au-dessous du kaolin 11-14 (mais le kaolin 11-14 et le kaolin 15-17 sont en contact dans 4% des cas). Le schéma de seuillage doit être choisi d'une façon vérifiant cette relation.

Tableau VI.12 Statistique sur les contacts des lithotypes du gisement

Contacts	Vers le bas				Vers le haut			
	N	Stérile	Argile 11-14	Argile 15-17	N	Stérile	Argile 11-14	Argile 15-17
Stérile	45106	0.982	0.010	0.008	45101	0.982	0.015	0.003
Kaolin 11-14	5320	0.123	0.832	0.044	5321	0.088	0.832	0.080
Kaolin 15-17	10938	0.014	0.039	0.947	10942	0.032	0.022	0.947

Les schémas possibles sont présentés dans la figure VI.24. L'analyse des variogrammes d'indicateur, nous aide pour opérer un choix. Cette analyse montre que les formes des variogrammes des indicateurs du stérile et du kaolin 15-17, se ressemblent beaucoup. La raison de cette ressemblance est leur continuité verticale par rapport à celle de kaolin 11-14. Pour cela le schéma, numéro 3 a été choisi.

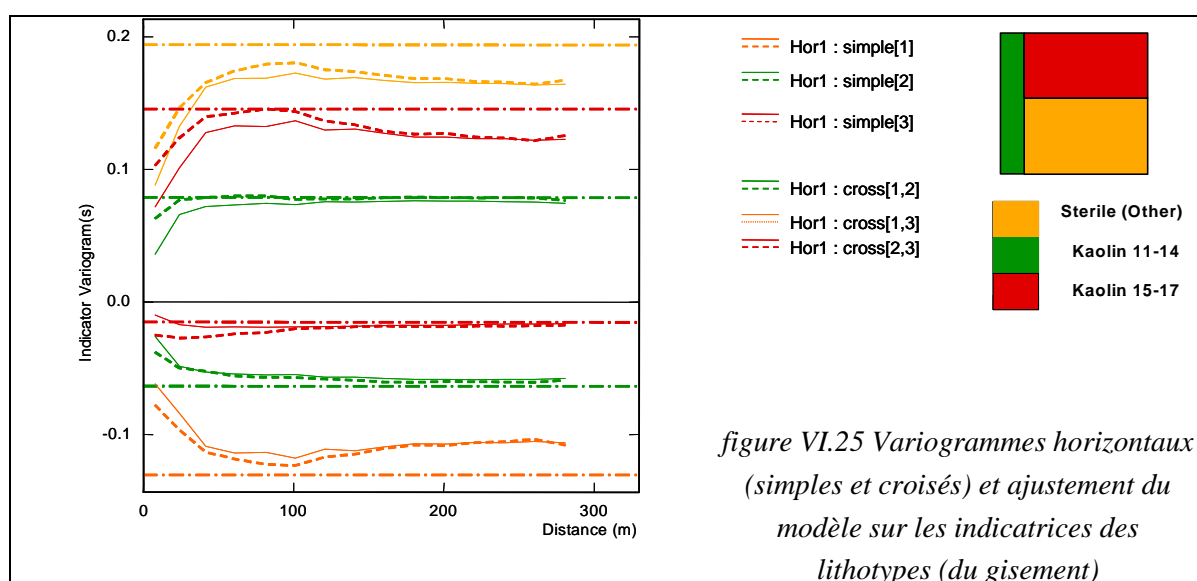


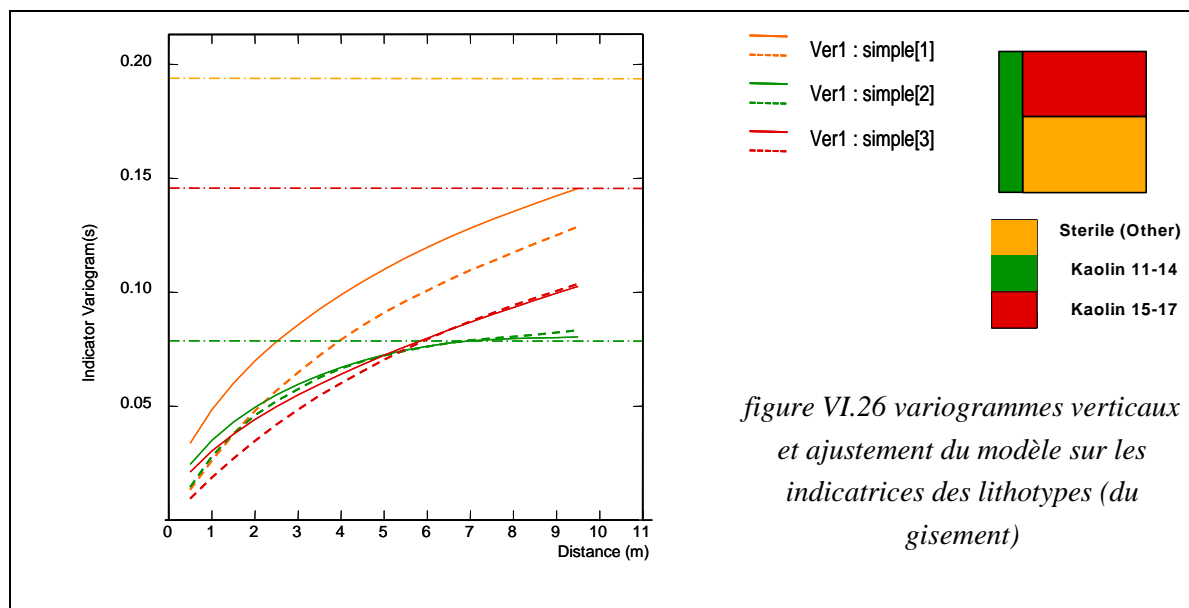
Les variogrammes des indicateurs des faciès ont été calculés dans la direction verticale et selon l'horizontale (tolérance de 90 degré).

Selon l'horizontale, l'ajustement est satisfaisant aussi bien pour les variogrammes simples que pour les variogrammes croisés (figure VI.25). Cependant, pour le variogramme vertical (figure VI.26) on n'a pas pu obtenir un aussi bon résultat. Les paramètres d'ajustement sont :

Modèle sphérique isotrope ;

G1 : $\gamma(h) = \text{Sph.}(40,8)$ et G2 : $\gamma(h) = \text{Sph.}(60,40)$, le premier chiffre entre parenthèses représente la portée horizontale, et le deuxième est la portée verticale. La grande portée verticale du deuxième modèle traduit la continuité verticale du stérile.

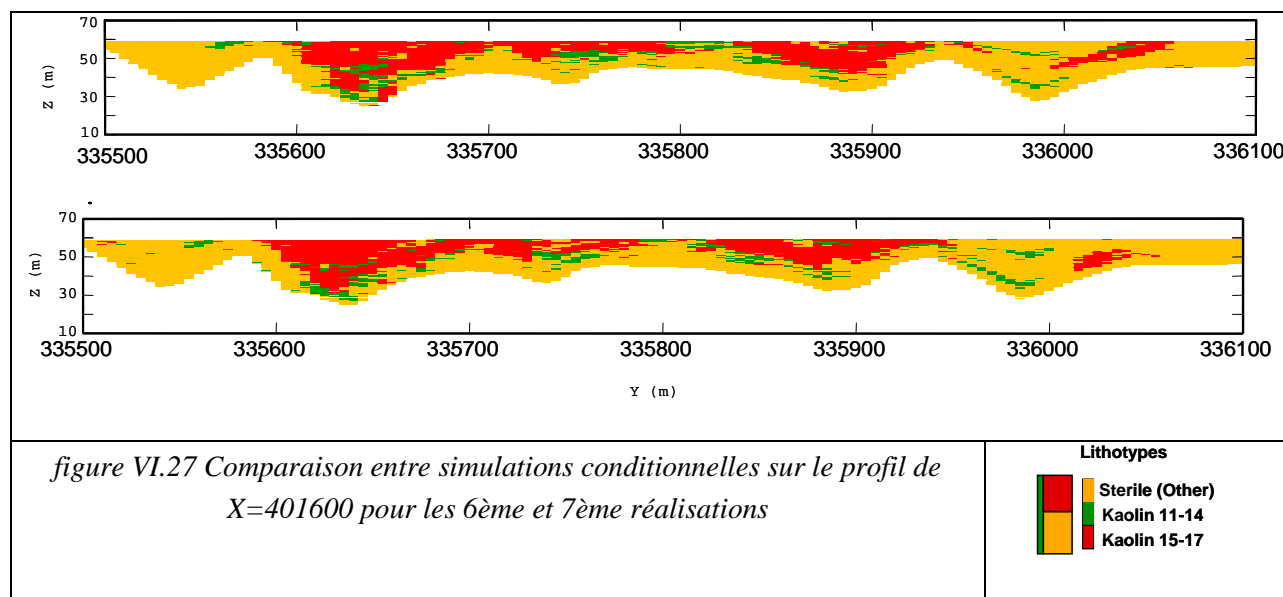


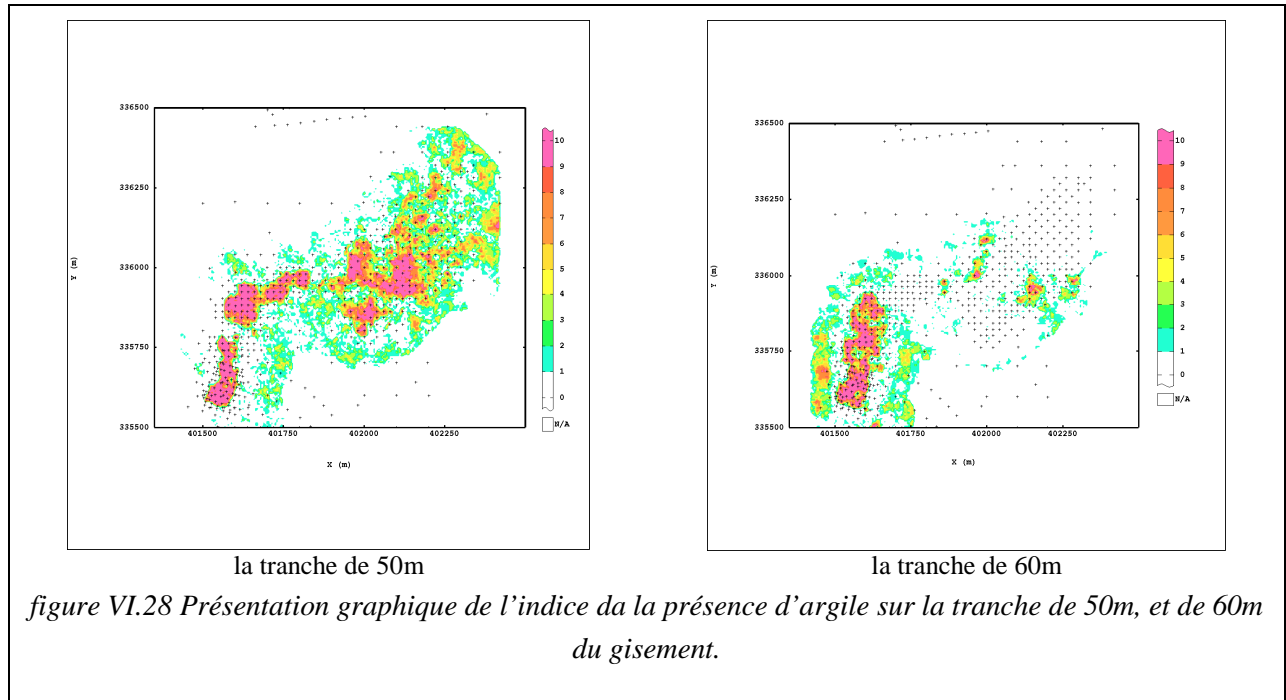


VI.4.6. Simulations des lithofaciès lithologiques du gisement

Les simulations conditionnelles reproduisent les principales caractéristiques des lithotypes du gisement. On distingue la continuité latérale des couches kaoliniques (Kaolin15-17) par rapport aux kaolins 11-14. On peut apercevoir l'effet du guidage de la surface inférieure délimitant le gisement, sur la forme des lithotypes (le dépôt de kaolin 11-14, autour de fossé de $y=336000$, dans la figure VI.27)

Pour chaque maille, la fréquence de la présence d'argile, est calculable sur toutes les réalisations de la simulation conditionnelle. On a construit seulement 10 réalisations, donc approximativement, cette présence peut être évaluée comme un indice de probabilité sur 10. Le résultat est présenté figure VI.28 pour deux tranches horizontales d'altitude 50m et 60m. (Pour avoir une meilleure stabilité statistique, normalement on utilise un nombre plus important de réalisations).





VI.5. Conclusion

L'arrangement des lithotypes montre que les contacts entre tous les faciès sont possibles. Les variogrammes horizontaux de l'indicateur de stérile et de kaolin 15-17 se présentent comme plus continus que le variogramme de l'indicateur de kaolin 11-14.

Un des résultats les plus importants de cette étude est de mettre en évidence l'importance des surfaces délimitantes du gisement. On constate que la forme des lithotypes est affectée très clairement par la forme de ces surfaces. Si la variation de distance entre les deux surfaces devient plus importante, les valeurs produites par l'interpolation et la forme des lithotypes obtenus semblent très éloignées des représentations usuelles. Des variabilités zonales sur le gisement, connues des géologues, n'ont pas été prises en compte, et ceci peut être un élément d'explication du caractère déroutant des résultats pour l'exploitant, dans une perspective opérationnelle..

C'est pourquoi une autre étude est réalisée sur une séquence bien limitée du gisement de Bois Des Rentes.

VI.6. Simulation de la deuxième séquence kaolinique du BDR

Dans cette étude seulement une partie du gisement est simulée. Le problème des surfaces de guidages et de mise en relation des données est aussi présent pour la simulation. C'est pourquoi, on procède à une simulation en essayant de rester fidèle aux principes géologiques de mise en place du dépôt, dans la mise en relation des données.

VI.6.1. Délimitation verticale d'une séquence kaolinique

Le but de cette partie de l'étude était la délimitation d'une séquence d'argile kaolinique située à une altitude approximativement entre 40m et 50m. La délimitation a été faite à l'aide des points marquant le toit et le mur de la séquence kaolinique (la plus continue) sur les sondages.

Pour arriver à ce but, les données ont été chargées dans le logiciel de CORALIS, une série de profils horizontaux et obliques a été tracée sur la maille des sondages. Grâce à l'option de CPZY de CORALIS, la section des sondages a été dessinée, deux séries de courbes ont été tracées pour limiter la séquence kaolinique dans chaque section. Pour créer une surface limite, CORALIS utilise le maillage triangulaire des points des courbes successives tracées sur chaque section. Dans cette étude, on a utilisé seulement le fichier ASCII conservant les coordonnées des points marqueurs sur chaque sondage. Le maillage a été fait en estimant individuellement des surfaces par krigeage.

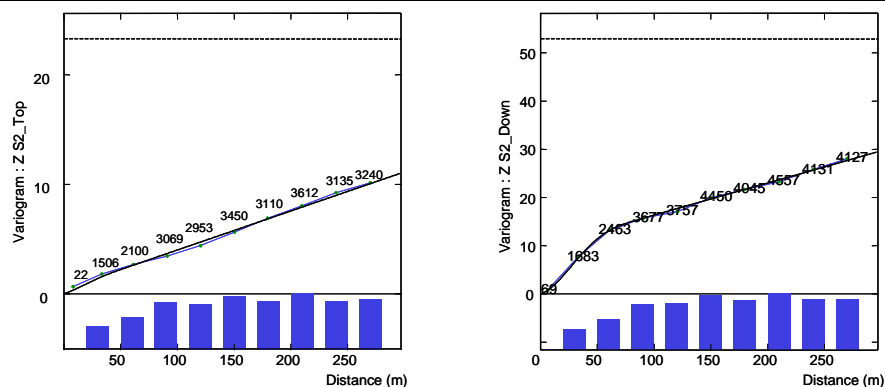
L'interprétation géologique et mise en corrélation des couches argileuses, ont été faites en tenant compte des relations génétiques et géométriques des couches. Un des paramètres géométrique importants est le positionnement vertical de chaque échantillon argileux par rapport aux échantillons correspondants des sondages voisins sur la section.

Dans certains sondages on rencontre des lentilles isolées à une altitude élevée. On n'a pas utilisé une interpolation automatique, qui suit exactement les points de la première à la dernière occurrence d'argile dans chaque sondage. Les lentilles isolées n'ont pas été retenues dans le polygone, et le marqueur de la surface supérieure de la séquence, a été positionné plus bas.

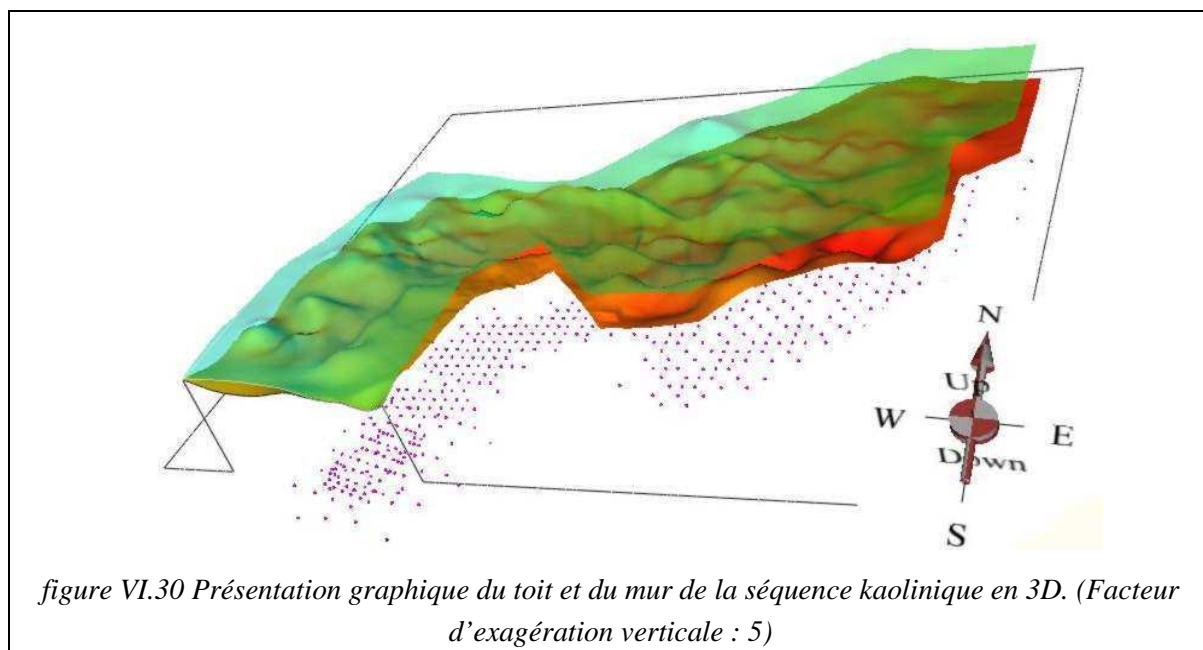
L'érosion d'argile a été utilisée comme un signe pour le toit de la séquence. L'érosion se distingue par la sédimentation de sable grossier (code82) au dessus des couches kaoliniques. Sur certains sondages l'érosion était plus forte, il existe alors un chenal de sable plus profond par rapport aux sondages voisins. La surface de délimitation ne suit pas exactement la surface d'érosion (frontière entre argile et sable), mais une surface plus lisse qui prend aussi en compte une partie de sable. Ce qui introduit une dilution.

On a essayé de corriger certaines interprétations en les contrôlant sur des sections de profils obliques. Cela n'est pas très facile à gérer. Malgré l'option de CORALIS pour tracer la surface, il existe une limite pour éditer les courbes tracées. Pour cela on a utilisé l'option de « Duplicate » d'Isatis pour filtrer les premières interprétations.

figure VI.29
Variogrammes des
surfaces de toit et de
mur et leur modèle



Les variogrammes ne sont pas stationnaires (figure VI.29); on ajuste un modèle intrinsèque sur une distance de 300m ; une combinaison d'un modèle cubique et d'un modèle linéaire a été utilisée pour modéliser les variogrammes des deux surfaces. La portée du modèle cubique est respectivement 60 et 90m. Les surfaces créées sont présentées dans la figure VI.30.



VI.6.2. Analyse statistique des lithotypes de la séquence kaolinique

VI.6.2.1. La statistique des lithotypes

L'unité encadrée par deux surfaces, le toit et le mur de la séquence kaolinique est le produit d'une interprétation géologique. On utilise un polygone pour encadrer la séquence kaolinique. Elle est subdivisée en 23 niveaux, On regroupe les lithologies sous 3 lithotypes (Tableau VI.13). L'argile ligniteuse ne sera pas exploitée. Les simulations de la séquence kaolinique seront faites à une échelle plus fine que celles du gisement. C'est pourquoi on a l'intérêt à la regrouper avec la stérile. Les proportions des lithotypes sont présentées dans le Tableau VI.14.

Tableau VI.13 Regroupement des lithologies de la séquence kaolinique sous 3 lithotypes.

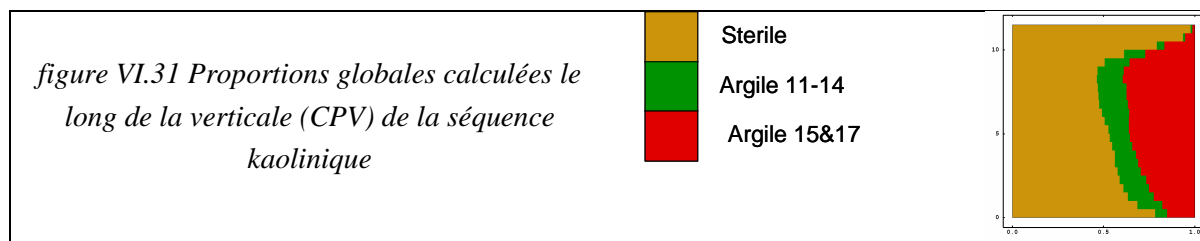
Code Faciès	Code Lithotype	Description	Nom Lithotype	Couleur
0, 1,2	1	Stérile couverture	Stérile	Orange
8, 10, 84, 85,86, 96	1	Argiles impures	Stérile	
16	1	Argile ligniteuse	Stérile	
80-84	1	Sable	Stérile	
11, 12, 13, 14	2	Argile kaolinique + peu de quartz ou mica	Kaolin 11-14	Verte
15, 17	3	Argiles kaolinique pures	Kaolin 15-17	Rouge

Tableau VI.14 Proportions des lithotypes de la séquence kaolinique

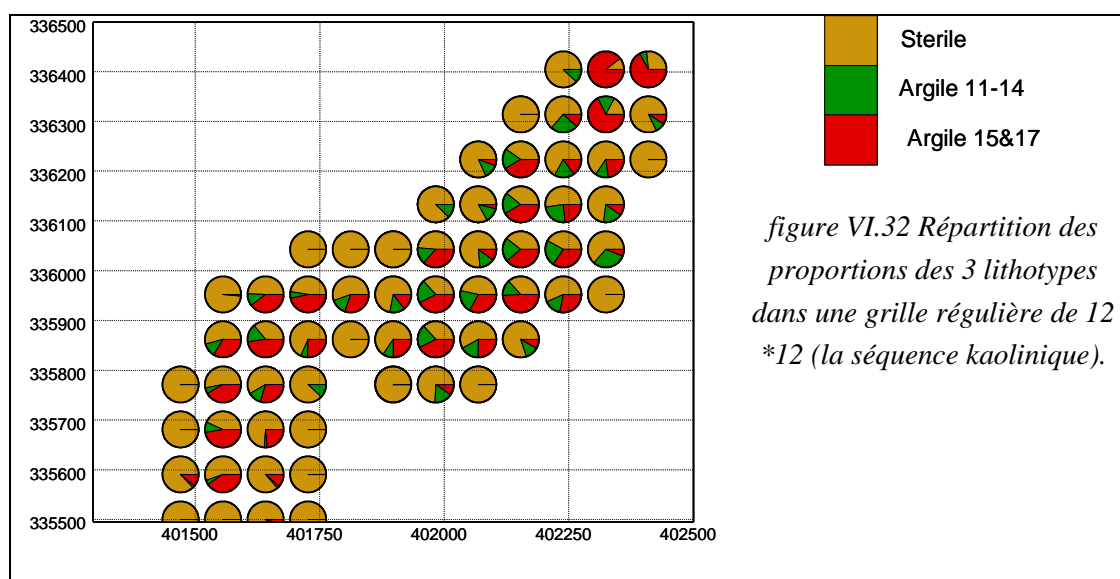
Lithotype	Proportions initiales	Proportions discrétisées	Proportions assignées
1	0.703	0.737	0.737
2	0.097	0.086	0.086
3	0.200	0.177	0.177

VI.6.2.2. La courbe de proportion verticale (CPV) des lithofaciès

La courbe globale de proportion verticale des lithofaciès (figure VI.31) montre une non stationnarité verticale des lithofaciès. Le toit est affecté par la présence de stérile, ensuite la proportion d'argile augmente, elle se dégrade lentement en descendant vers le bas de la série.



La figure VI.32 représente les proportions de chaque lithotype calculées à la verticale de chaque parcelle (la moyenne des sondages de chaque parcelle). La proportion des argiles est très faible dans les parcelles situées en bordure de la séquence. La stationnarité horizontale est difficilement tenable, même en restreignant l'extension latérale ; une maille plus grande pourrait peut-être, rendre l'image plus stationnaire. La courbe verticale des proportions des lithofaciès est alors reproduite sur chaque parcelle comme le montre la figure VI.33. Le Tableau VI.15 compare la proportion des lithotypes sur les CPV.



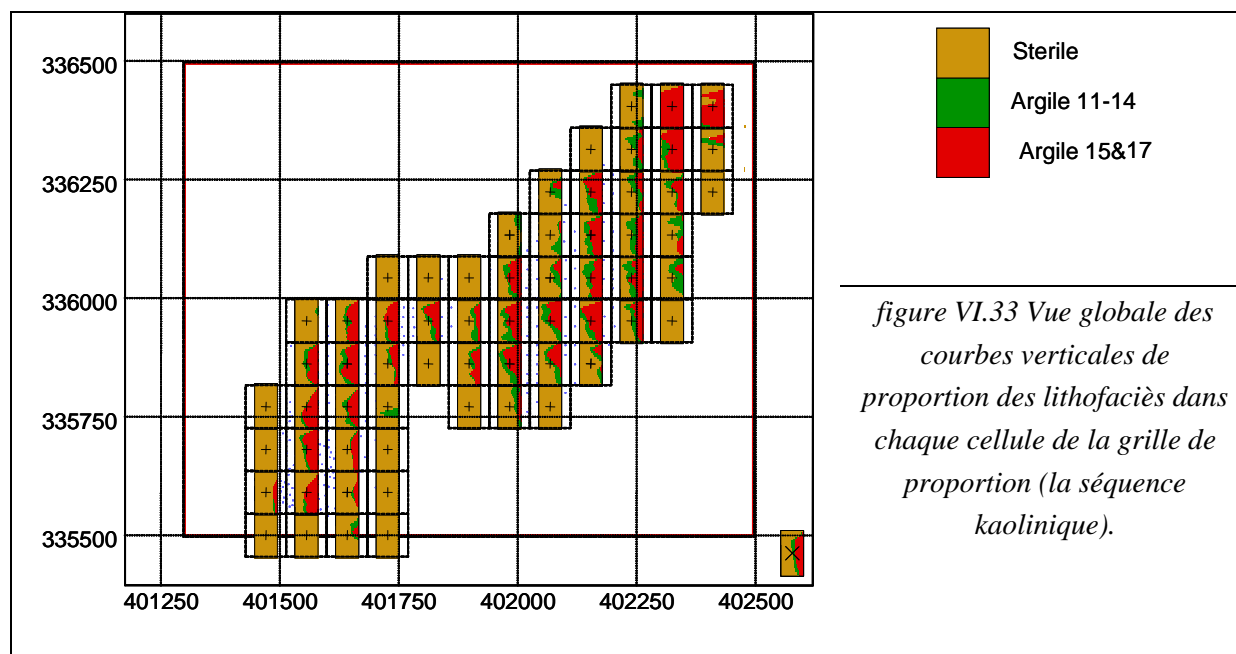


Tableau VI.15 Comparaison des proportions des lithotypes de la séquence kaolinique, sur les CPV

Lithotype	CPV globale	CPV régularisé	CPV calculé sur la grille
1	0.740	0.828	0.884
2	0.085	0.063	0.063
3	0.175	0.109	0.109

VI.6.3. Calcul des variogramme de la séquence kaolinique

On a suivi le même processus pour modéliser les variogrammes des lithotypes dans la séquence kaolinique. Le choix de son schéma est aussi, basé sur la statistique des contacts verticaux, présentés dans le Tableau VI.16.

On constate que, la chance de retrouver le kaolin 11-14 ou le kaolin 15&17, est quasiment égale, en sortant de stérile vers le bas de séquence (4% et 5%). Le stérile à trois fois plus la chance pour être situés sur le kaolin 11-14 que le kaolin 15&17. Pour cela le schéma des lithotype doit être choisi d'une façon assurant de cette relation.

Tableau VI.16 Statistique sur les contacts des lithotypes de la séquence kaolinique

Contacts	Ver le bas				Ver le haut			
	N	Stérile	Argile 11-14	Argile 15&17	N	Stérile	Argile 11-14	Argile 15&17
Stérile	6265	0.907	0.042	0.051	6177	0.920	0.062	0.018
Kaolin 11-14	1261	0.301	0.574	0.124	1282	0.204	0.566	0.230
Kaolin 15&17	3083	0.037	0.096	0.868	3150	0.101	0.050	0.849

Les variogrammes des indicatrices des faciès ont été calculés dans la direction verticale et dans deux directions horizontales (0 et 90, tolérance de 45 degré).

Selon l'horizontale, l'ajustement est satisfaisant aussi bien pour les variogrammes simples que pour les variogrammes croisés (figure VI.34 et figure VI.35). Malgré une légère différence entre les variogrammes de deux directions horizontales, on a préféré de garder un modèle isotrope dans le plan horizontal.

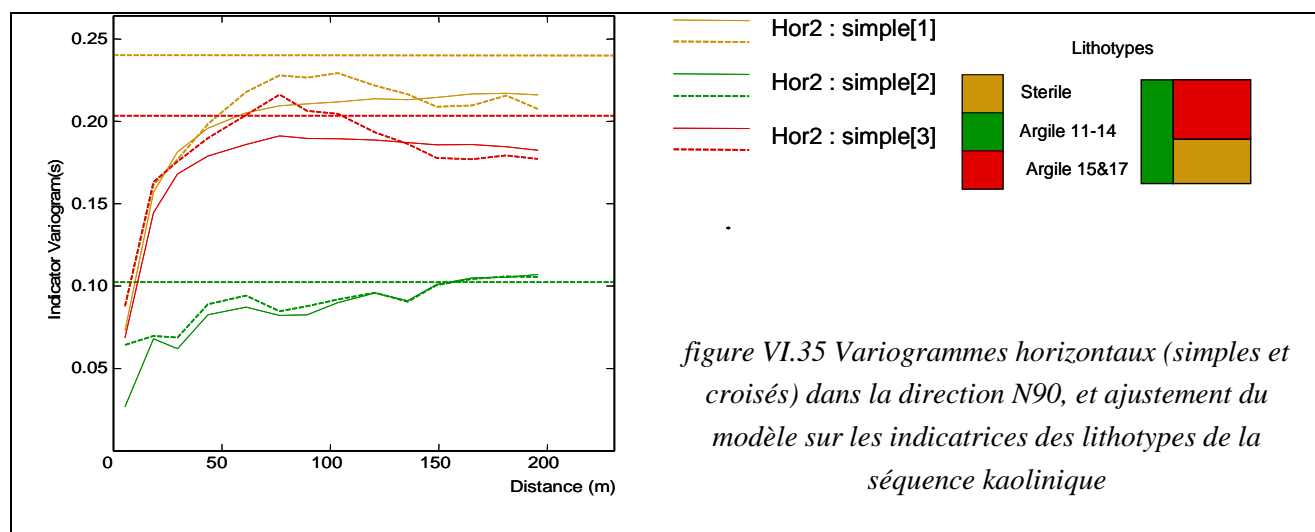
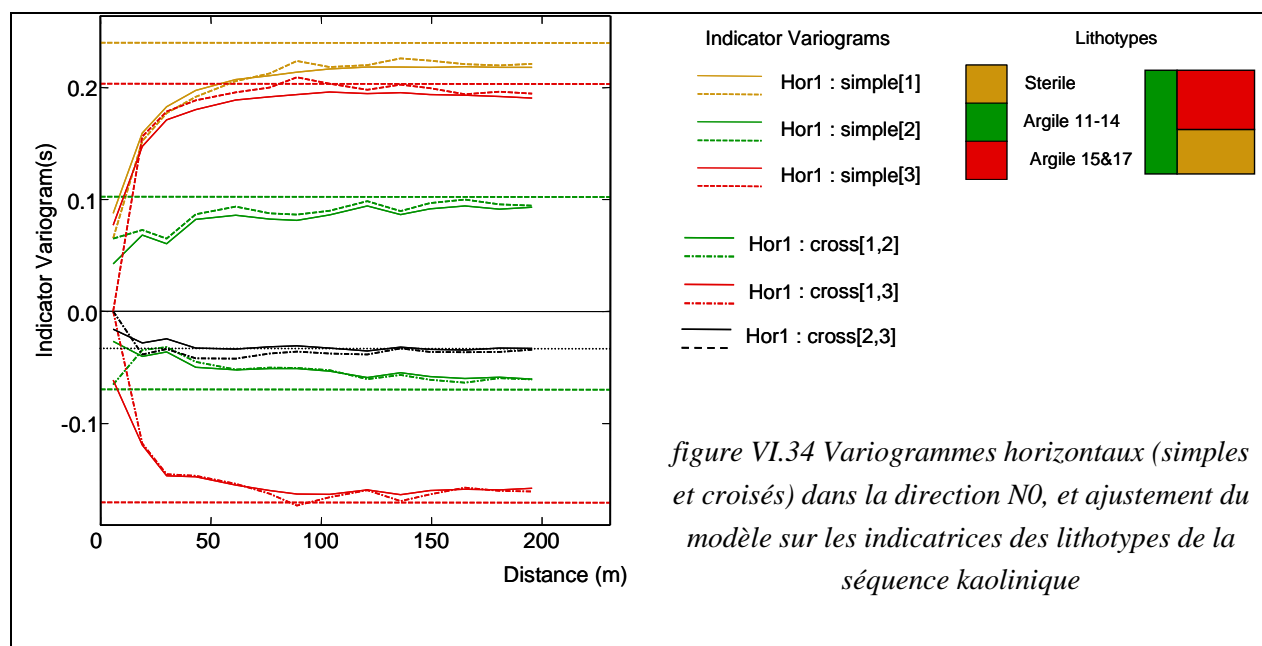
Cependant, pour le variogramme vertical (figure VI.36) on n'a pas pu obtenir d'aussi bon résultat que dans les directions horizontales. Mais l'ajustement a été amélioré considérablement, par rapport à celui du variogramme vertical du gisement. Les paramètres d'ajustement sont :

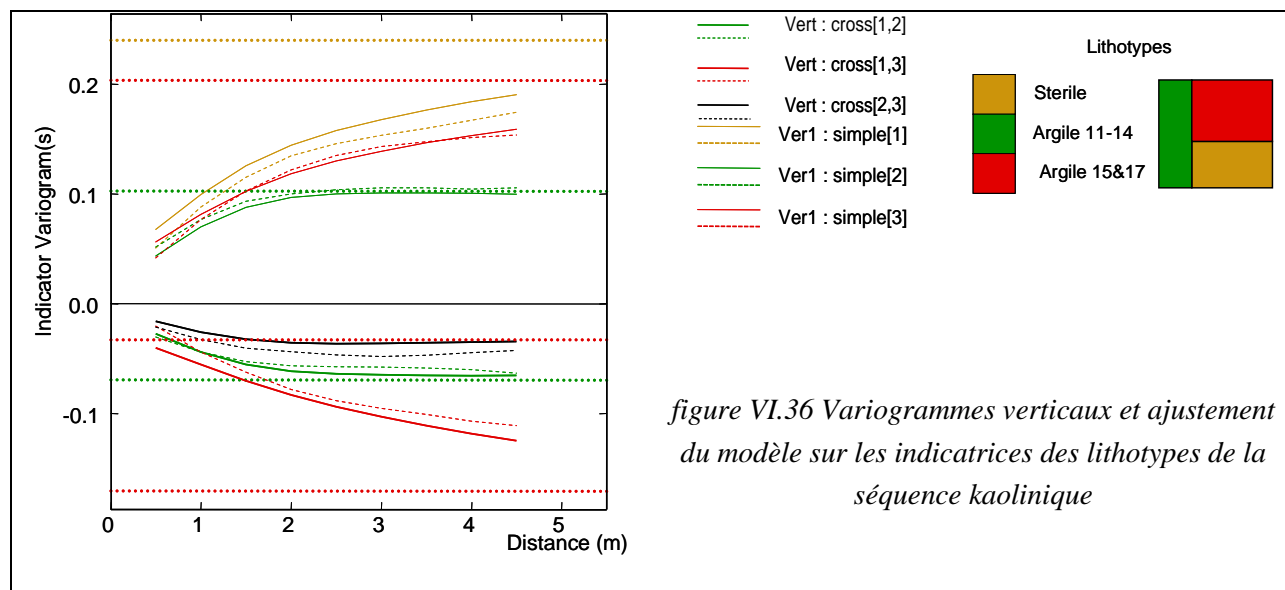
Modèle gigogne cubique avec un effet de pépité faible ;

G1 : $\gamma(h) = 0.05 * \text{pépitique} + 0.75 * \text{Cubique}(20,3) + 0.20 * \text{Cubique}(60,5)$

G2 : $\gamma(h) = 0.05 * \text{pépitique} + 0.65 * \text{Cubique}(40,20) + 0.30 * \text{Cubique}(100,8)$

Le premier chiffre entre parenthèses représente la portée horizontale, et le deuxième est la portée verticale. La grande portée verticale de la deuxième composant est liée à la continuité verticale du stérile. Le modèle dans le cas de séquence kaolinique est plus continu que celui calculé pour la totalité du gisement.



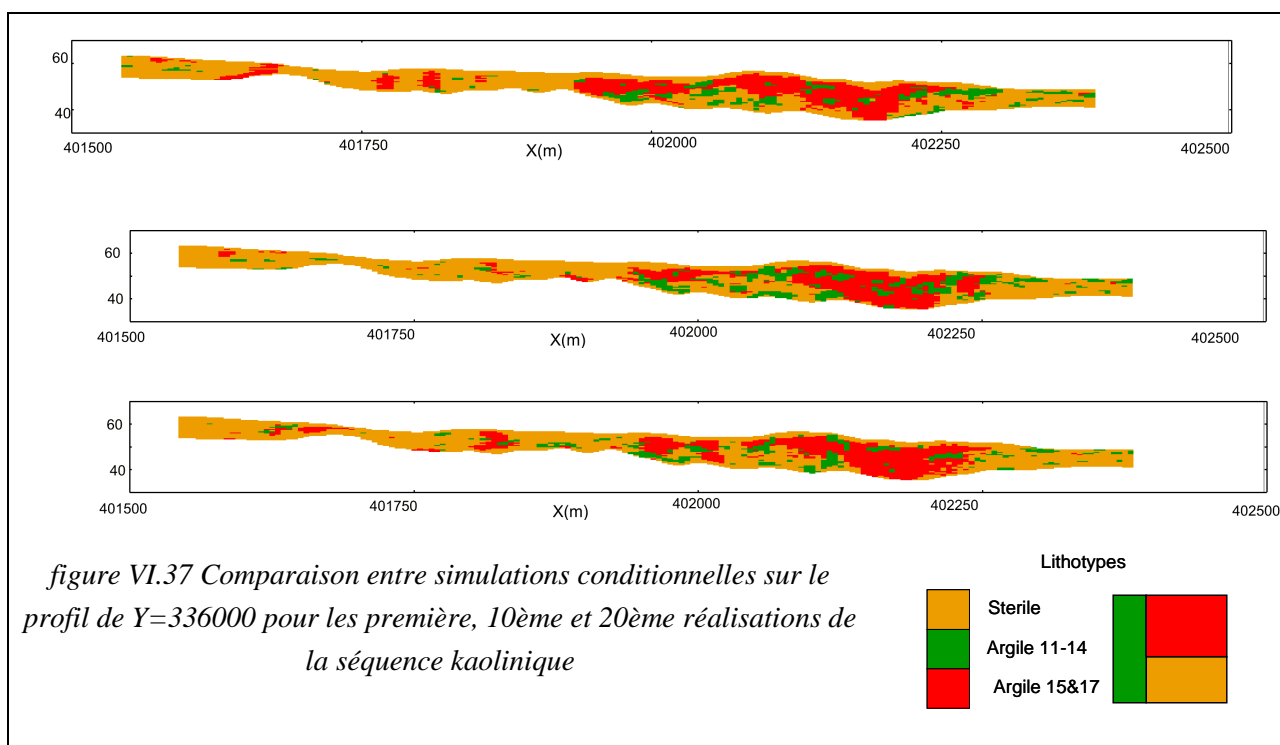


VI.6.4. Simulations des lithofaciès lithologique de la séquence kaolinique

La figure VI.37 montre trois réalisations de la simulation sur le profil de Y=336000, on peut constater certaines différences entre ces trois graphiques.

Les simulations conditionnelles ont été faites ici en reproduisant 25 réalisations. On note la continuité latérale des couches kaoliniques (Kaolin 15&17) par rapport aux kaolins 11-14.

Pour chaque maille, la fréquence de la présence d'argile, est calculable sur toutes les réalisations de la simulation conditionnelle. On dispose seulement 25 réalisations, donc approximativement, cette présence peut être évaluée comme un indice de probabilité sur 25, qui est exprimable au pourcentage. On le présente graphiquement, sur deux tranches horizontales de l'altitude de 50m et de 60m (figure VI.38).



Il est possible de produire de la même façon, une carte pour chaque lithotype, ce plan peut être utilisé comme le plan de risque d'exploitation

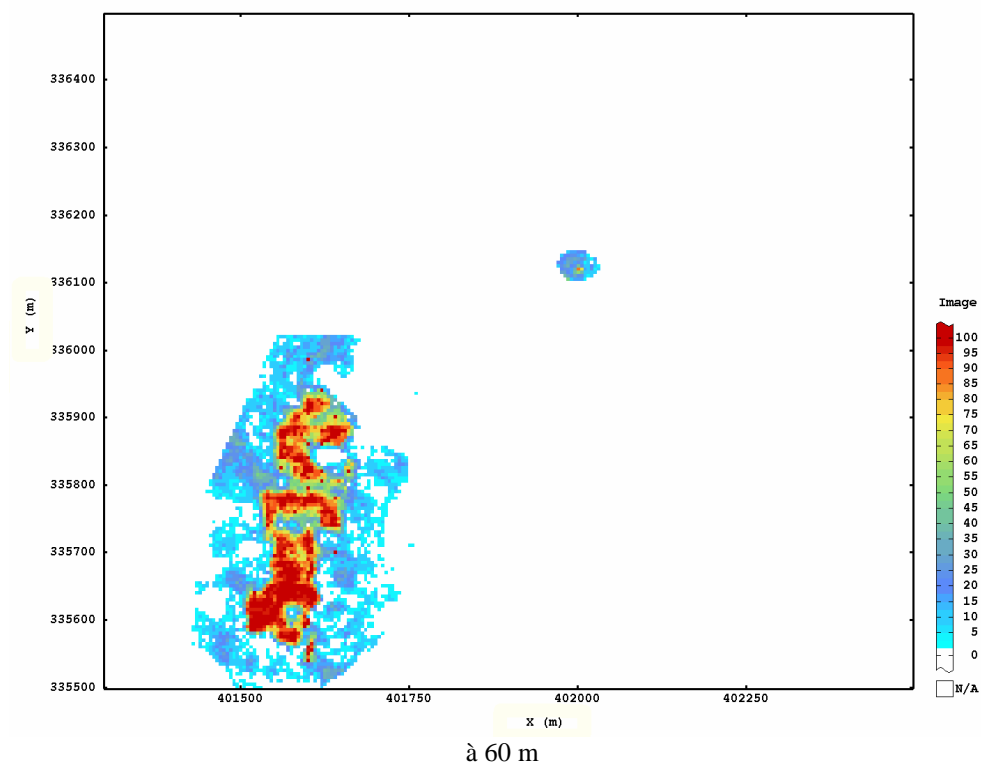
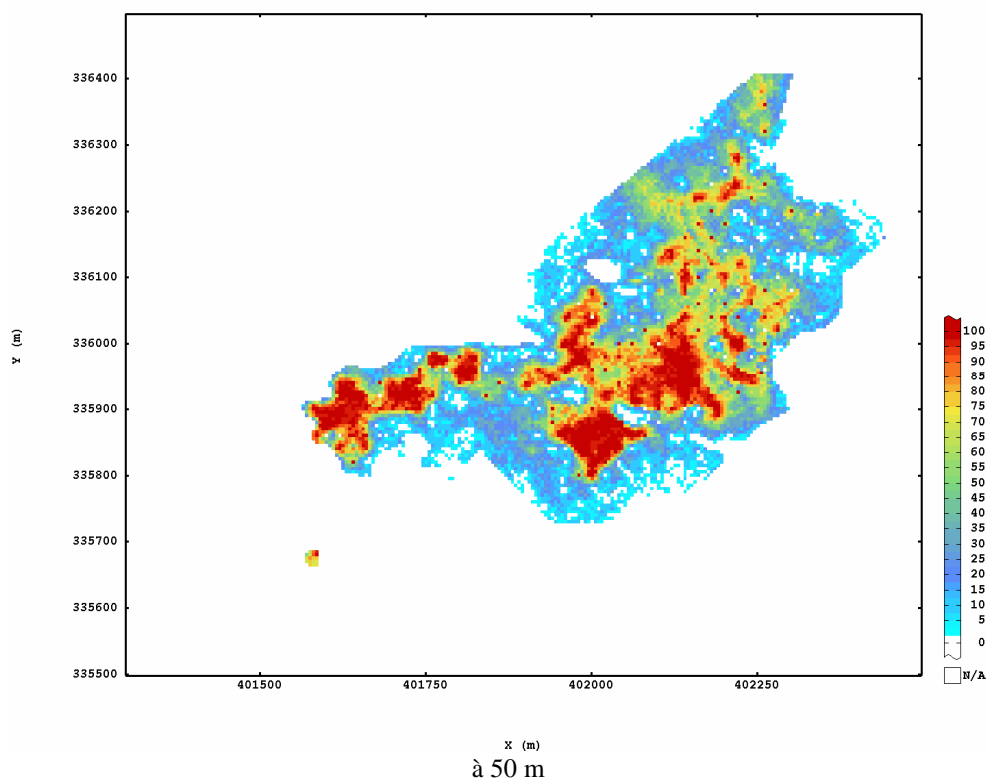


figure VI.38 Présentation graphique de la chance de présence d'argile sur la tranche de 50m et 60m, de la séquence kaolinique.

VI.6.5. Statistiques sur plusieurs simulations

Il y a différentes façons pour analyser les résultats d'une simulation. On peut comparer les résultats des différentes réalisations d'une simulation entre eux, cela permet d'avoir une information sur la stabilité du modèle. La confrontation des résultats de simulation avec le résultat d'une autre méthode de simulation est une autre approche d'analyse du modèle.

Tableau VI.17 Proportion des lithotypes simulés dans chaque réalisation de simulation

Réalisation	Stérile	Kaolin 11-14	Kaolin 15-17
Réal-1	83.50	6.11	10.38
Réal-2	83.49	6.01	10.50
Réal-3	83.47	6.08	10.45
Réal-4	83.28	5.95	10.77
Réal-5	83.58	6.08	10.34
Réal-6	82.98	6.08	10.95
Réal-7	83.93	5.96	10.12
Réal-8	83.36	5.61	11.02
Réal-9	83.66	6.01	10.33
Réal-10	83.82	5.85	10.33
Moyenne	83.51	5.97	10.52
Ecart type	0.27	0.15	0.30
Coef. Var.(%)	0.32	2.52	2.81

On présente ici la proportion de chaque lithotype sur la totalité de l'unité simulée. Pour la simulation faite sur une unité contenant la totalité du gisement, on a un écart type faible, et la variation autour de la moyenne est faible et aléatoire.

Tableau VI.18 Proportion des lithotypes simulés dans chaque réalisation de la simulation faite sur la séquence kaolinique

Réalisation	Stérile	Kaolin 11-14	Kaolin 15&17	Réalisation	Stérile	Kaolin 11-14	Kaolin 15&17
Réal-1	64.97	11.94	23.09	Réal-15	64.10	11.56	24.34
Réal-2	65.84	11.90	22.26	Réal-16	65.21	11.87	22.92
Réal-3	65.02	12.01	22.97	Réal-17	64.38	11.74	23.87
Réal-4	64.69	11.94	23.36	Réal-18	64.01	11.76	24.23
Réal-5	64.73	11.96	23.31	Réal-19	64.27	11.56	24.17
Réal-6	64.83	11.73	23.44	Réal-20	64.19	11.74	24.07
Réal-7	64.31	11.50	24.19	Réal-21	64.59	11.38	24.03
Réal-8	63.79	12.22	23.99	Réal-22	64.95	11.32	23.74
Réal-9	65.11	11.69	23.20	Réal-23	64.88	11.77	23.36
Réal-10	63.83	12.46	23.71	Réal-24	64.34	12.24	23.42
Réal-11	64.89	11.49	23.62	Réal-25	64.58	11.70	23.72
Réal-12	64.23	11.92	23.85	Moyenne	64.57	11.81	23.62
Réal-13	64.88	12.07	23.05	Ecart type	0.52	0.27	0.55
Réal-14	63.51	11.79	24.70	Coef. Var.(%)	0.81	2.29	2.32

VI.7. Conclusion

Comme on peut le constater le choix des surfaces limitantes basé sur une interprétation lithostratigraphique permet d'avoir une corrélation plus marquée entre les données, correspondant à une logique géologique. Les variogrammes sont plus continus dans les gisements récents.

La comparaison entre les différentes réalisations de la simulation des lithofaciès démontre que la maille de sondage n'est pas assez fine pour rendre compte au niveau local des complexités géologiques dans ces gisements.

Les résultats de la simulation peuvent être présentés en tant que probabilité de la présence d'un lithofaciès défini. Cela constitue cependant un outil intéressant pour définir les limites du gisement.

VI.8. Simulation de la qualité d'argile en tant qu'une variable catégorielle

Sept catégories ont été assignées aux échantillons ; on a utilisé les fourchettes principales d' Al_2O_3 pour classer des argiles kaoliniques. La teneur est décrite comme une variable continue. On examine cette continuité à l'échelle verticale sur les échantillons du gisement BDR

VI.8.1. Analyse des contacts des fourchettes d' Al_2O_3

Le Tableau VI.19 montre les contacts verticaux entre les groupes d'argile. On ne peut pas confirmer la continuité mathématique de la teneur à l'échelle des échantillons.

Au contact entre un échantillon ayant une teneur faible et un autre échantillon fortement enrichi en Al_2O_3 , le changement de la teneur entre les deux échantillons, n'est pas toujours continu, et nécessairement on doit accepter une certaine non-conformité géologique et les changements brutaux. C'est pourquoi on aura des problèmes pour l'utilisation de modèle gaussienne seuillée, afin de simuler toutes les fourchettes.

Malgré tout, le contact entre la fourchette basse teneur et la fourchette très haute teneur reste limité ; on en profitera pour définir un modèle plurigaussiennes, en regroupant les fourchettes ensemble.

Tableau VI.19 Effectif des contacts verticaux entre les fourchettes d' Al_2O_3

(le sens d'investigation ; vers le bas)

Groupe	Stérile	-30[	[30,34[	[34,37[	[37,40[	[40,42[	[42,44[	[44	lignite	Somme
Stérile	13516	14	505	126	146	135	228	142	17	14829
-30[	11	1	5	9	8	3	0	0	0	37
[30,34[	595	5	154	49	50	42	22	7	7	931
[34,37[	179	8	70	50	49	31	19	8	5	419
[37,40[	180	3	61	61	89	76	67	5	9	551
[40,42[	140	3	46	65	80	85	100	23	9	551
[42,44[	119	3	72	54	101	134	364	215	23	1085
[44	46	0	13	5	25	40	268	745	23	1165
lignite	26	0	6	3	4	5	20	23	25	112
Somme	14812	37	932	422	552	551	1088	1168	118	19680

Pour cette étude on a utilisé la délimitation faite pour la simulation lithologique de la séquence kaolinique. On utilise un polygone pour créer un cadre horizontal autour du gisement. La grille est subdivisée en 23 niveaux, on discrétise tous les 0.5 m verticalement.

On regroupe les classes du kaolin, sous 4 groupes, le Tableau VI.21 résume l'appellation de chaque groupe. Le Tableau VI.22 montre les proportions de différents groupes.

Les proportions initiales correspondant aux proportions calculées le long des sondages avant l'horizontalisation et la discrétisation (données brutes).

Les proportions discrétisées correspondent aux proportions calculées après l'horizontalisation et la discrétisation de tous les puits.

Les proportions assignées correspondent aux proportions affectées au centre de gravité de chaque cellule de la grille de simulation après horizontalisation et discrétisation.

Tableau VI.20 Effectif des contacts verticaux entre les fourchettes d' Al_2O_3

(le sens d'investigation ; vers le haut)

	Stérile	-30[	[30,34[	[34,37[	[37,40[	[40,42[	[42,44[	[44	lignite	Somme
Stérile	13516	11	595	179	180	140	119	46	26	14812
-30[	14	1	5	8	3	3	3	0	0	37
[30,34[	505	5	154	70	61	46	72	13	6	932
[34,37[	126	9	49	50	61	65	54	5	3	422
[37,40[	146	8	50	49	89	80	101	25	4	552
[40,42[	135	3	42	31	76	85	134	40	5	551
[42,44[	228	0	22	19	67	100	364	268	20	1088
[44	142	0	7	8	5	23	215	745	23	1168
lignite	17	0	7	5	9	9	23	23	25	118
Somme	14829	37	931	419	551	551	1085	1165	112	19680

Tableau VI.21 Regroupement des classes d'argile sous 4 groupes.

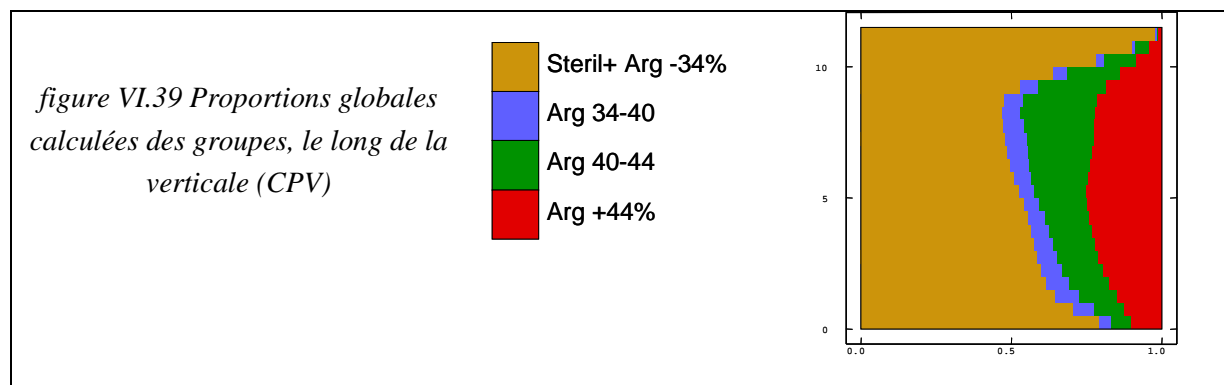
Classe des Fourchette	Code Groupe	Description	Nom Groupe	Couleur
Stérile	1	Tous les échantillons (autre que kaolin)	Stérile+Arg -30%	Brun
Lignite	1	Argile Ligniteuse		
[30,34[, -30[	1	Argile base teneur		
[34,37[, [37,40[	2	Argile teneur moyenne	Arg 34-40	Bleu
[40,42[, [42,44[	3	Argile haute teneur	Arg 40-44	Verte
[44	4	Argile hyper alumineuse	Arg +44	Rouge

Tableau VI.22 Proportions des groupes utilisés pour la simulation

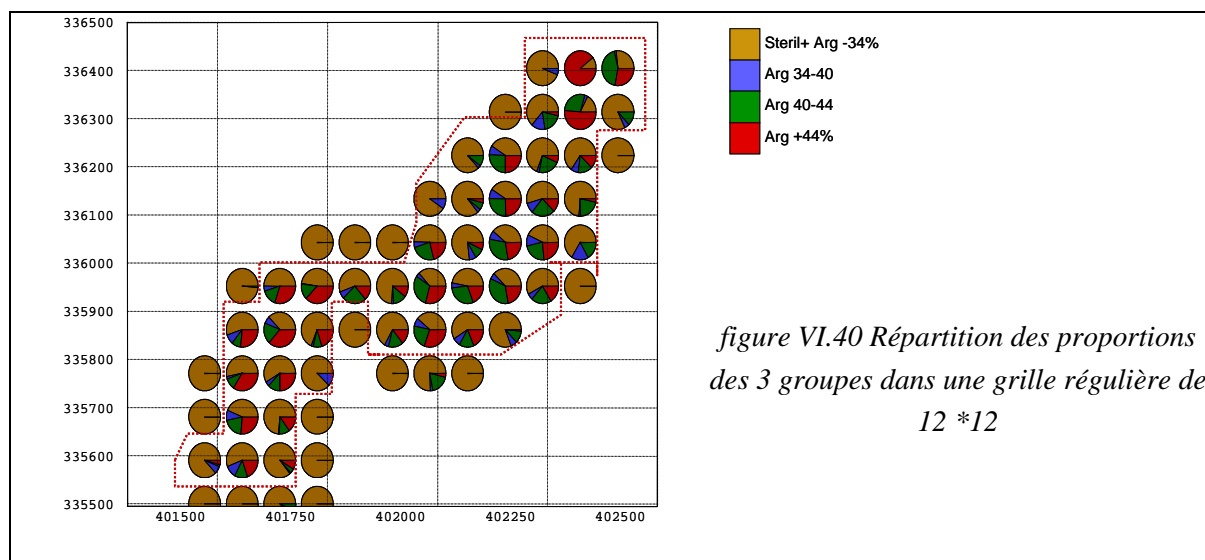
Groupe	Proportions initiales	Proportions discrétisées	Proportions assignées
Stérile+Arg. -30%	0.553	0.606	0.607
Arg. 34-40	0.050	0.056	0.055
Arg. 40-44	0.177	0.156	0.155
Arg. +44	0.210	0.183	0.183

VI.8.2. La courbe de proportion verticale (CPV) des groupes

La courbe globale de proportion verticale des lithofaciès (figure VI.39) montre une non stationnarité verticale des groupes. On a plus fréquemment les stériles (sables) à la base et à la tête de série, la proportion d'argile hyperalumineuse (Arg. +44%) augment au milieu du gisement, ensuite elle dégrade en montant vers le bas de série. La proportion de deuxième groupe reste quasiment constante (sauf en haut de série). Pour les argiles hautes teneur, une augmentation de la proportion est visible vers le haut de série, mais en haut elle se dégrade rapidement.



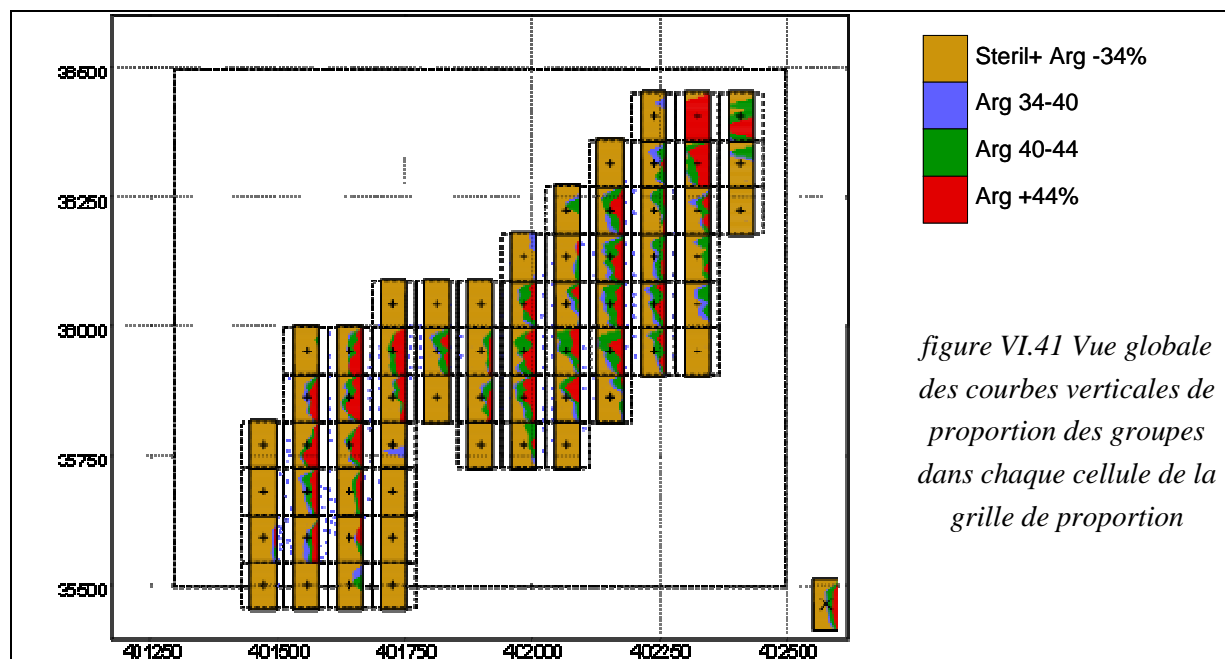
La figure VI.40 représente les proportions de chaque groupe calculées à la verticale de chaque parcelle (la moyenne des sondages de parcelle). On a utilisé 62 parcelles. Notons d'abord que la proportion des argiles est très faible dans les parcelles situées abord du gisement. Stationnarité horizontale peut être retenue en limitant du gisement. La courbe verticale des proportions des lithofaciès sont alors reproduite sur chaque parcelle comme le montre la figure VI.40 (les cellules de cette grille sont beaucoup plus larges que les cellules de grille finale de simulation).



L'estimation des proportions des groupes sur la grille régulière de simulation a été faite par le krigeage. Le modèle est un modèle linéaire. On Peut comparer les proportions des groupes, sur le CPV globale, et celles de grille d'estimation (240*200*130) à l'aide de Tableau VI.23.

Tableau VI.23 Comparaison des proportions des groupes du gisement, sur les CPV

Groupe	CPV globale	CPV régularisé	CPV calculé sur la grille
Stérile+Arg -30%	0.606	0.709	0.699
Arg 34-40	0.056	0.043	0.046
Arg 40-44	0.156	0.120	0.126
Arg +44	0.183	0.128	0.129
Echantillon	23	1426	407105



VI.8.3. Calcul du variogramme des gaussiennes et ajustement du modèle

La méthode plurigaussienne nécessite la définition de plusieurs fonctions aléatoires gaussiennes sous-jacentes (deux en pratique) en fonction de l'organisation des lithofaciès. Le choix de schéma est basé sur la statistique des contacts verticaux, on les présente dans le tableau suivant.

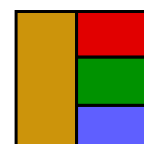
On constate que, on a quasiment la relation séquentielle a été amélioré par rapport au cas des relations lithologique. La relation entre « Arg 34-40 » et « Arg +44% » reste très limitée, on ignore la relation entre aux. Afin qu'on puisse simuler les groupe par un modèle ayant deux fonction gaussiennes.

Tableau VI.24 Statistique sur les contacts des groupes du gisement

Contacte	Ver le bas				
	N	Stérile+Arg -30%	Arg 34-40	Arg 40-44	Arg +44
Stérile+Arg -30%	6338	0.907	0.023	0.048	0.022
Arg 34-40	599	0.334	0.504	0.152	0.010
Arg 40-44	1691	0.145	0.089	0.649	0.116
Arg +44	1981	0.029	0.008	0.113	0.850
Contacte	Ver le haut				
	N	Stérile+Arg -30%	Arg 34-40	Arg 40-44	Arg +44
Stérile+Arg -30%	6253	0.920	0.032	0.039	0.009
Arg 34-40	612	0.234	0.493	0.247	0.026
Arg 40-44	1720	0.178	0.053	0.638	0.116
Arg +44	2024	0.068	0.003	0.097	0.832

figure VI.42 Arrangement choisi pour une simulation par la méthode plurigaussienne

Steril+ Arg -34%
 Arg 34-40
 Arg 40-44
 Arg +44%



Les variogrammes des indicatrices des faciès ont été calculés dans la direction verticale et dans deux direction l'horizontale (N0 et N90, tolérance : 45 degré).

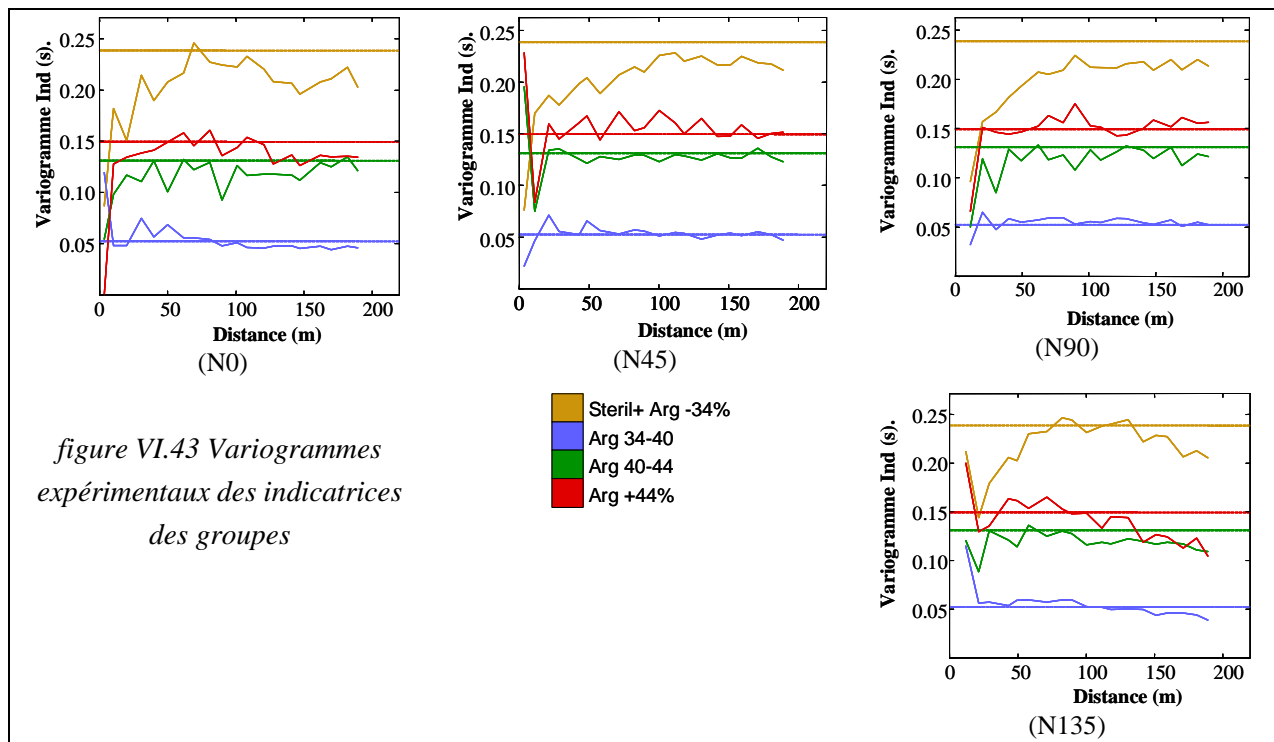
Pour trouver l'isotropie, les variogramme expérimentaux des indicatrices on été calculé dans 8 direction suivantes ; N0-90, N30-120, N45-135, N60-150, dont on a présente 4 dans la figure VI.43.

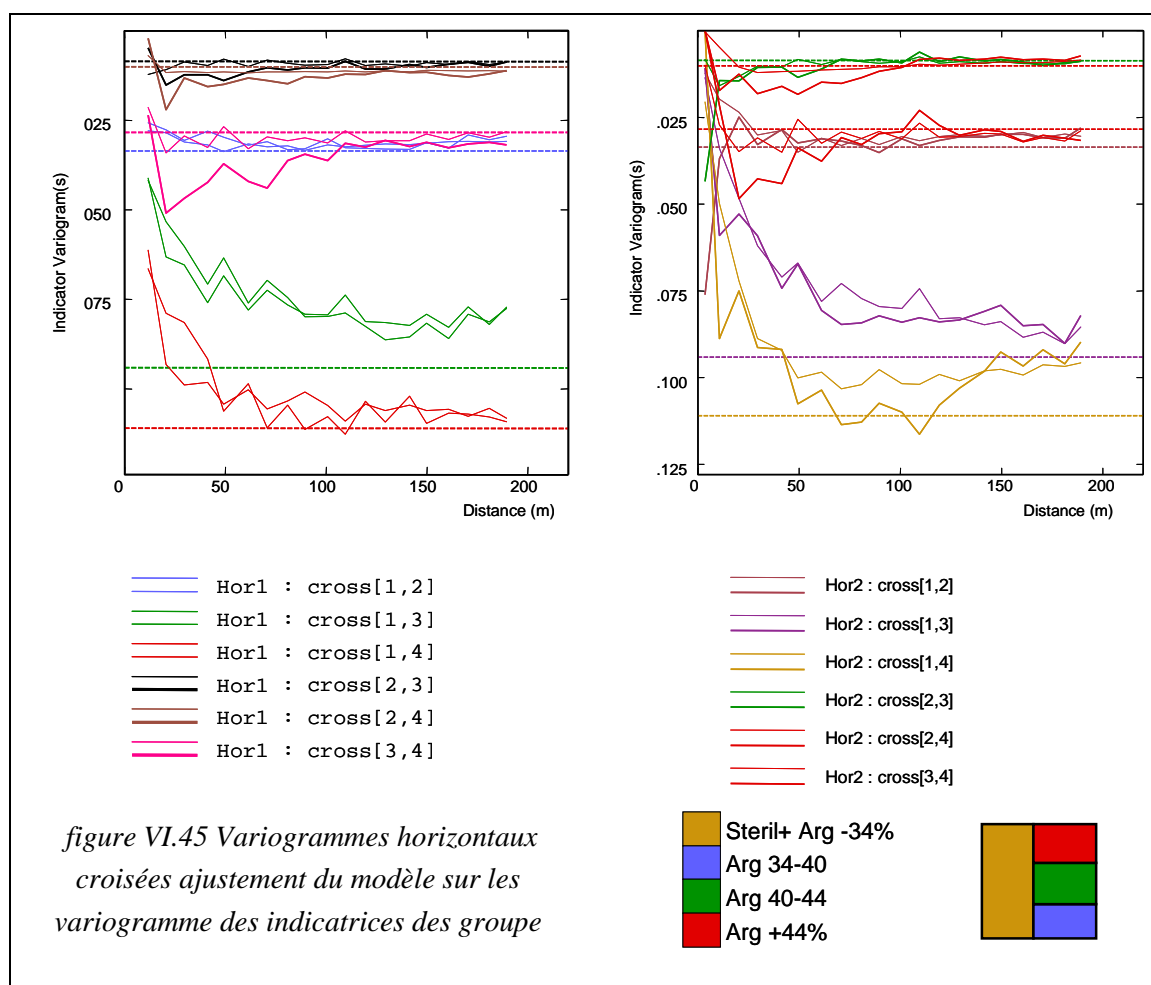
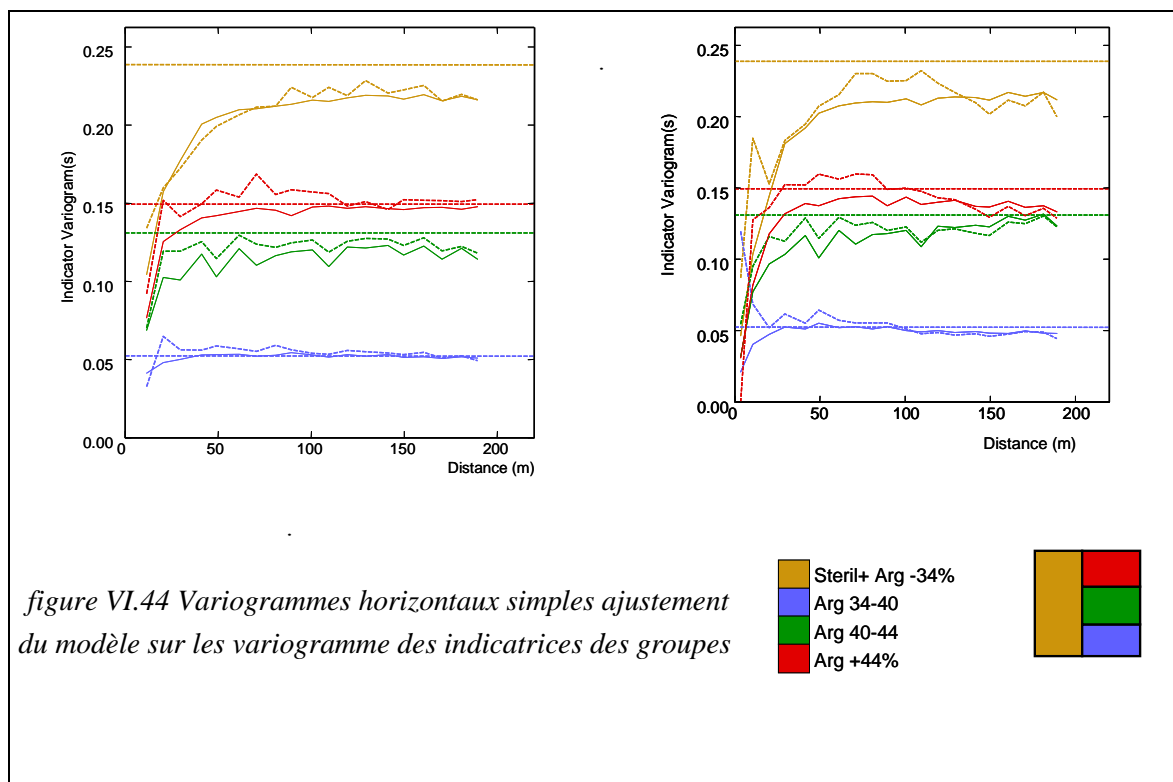
Finalement direction N0 et N90 ont été choisi pour modéliser l'anisotropie. Selon l'horizontale, l'ajustement est satisfaisant aussi bien pour les variogrammes simples que pour les variogrammes croisés (figure VI.44 et figure VI.45). Cependant, pour le variogramme vertical (figure VI.46) on n'a pas pu obtenir d'aussi bon résultat que la surface plan. Les paramètres d'ajustement sont :

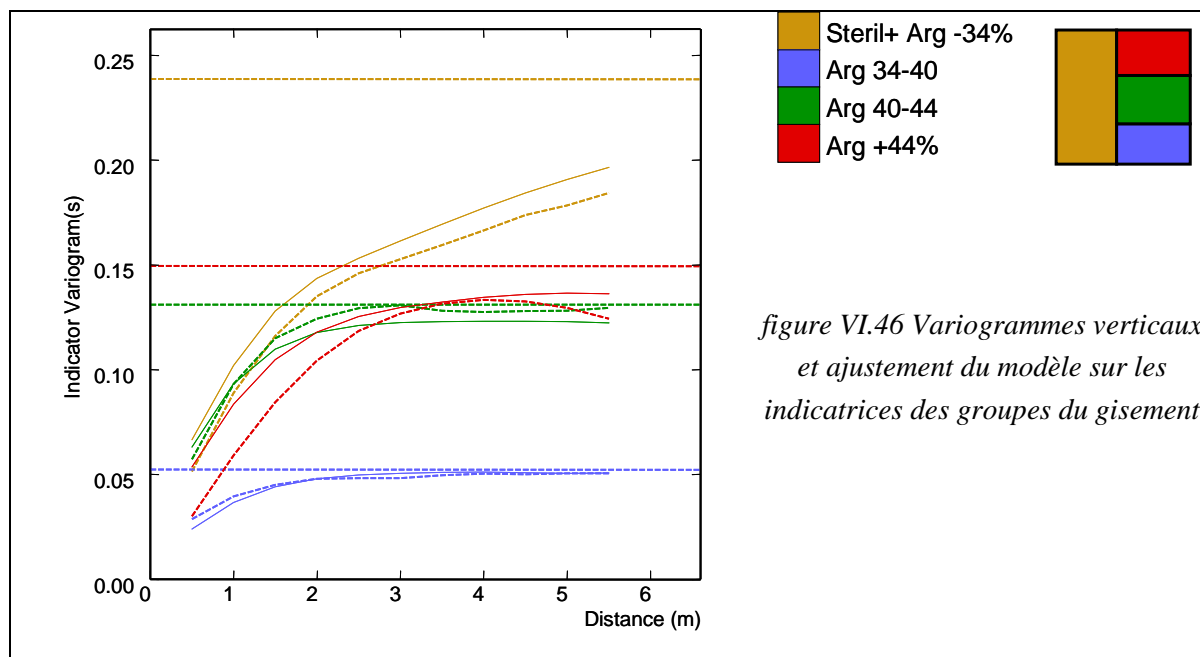
Modèle sphérique isotrope ;

G1 : $\gamma(h) = 0.05 * \text{Pépitique} + 0.25 \text{ Cubique}(30, 20, 2.5) + 0.7 \text{ Cubique}(80, 40, 15)$ et

G2 : $\gamma(h) = 0.3 \text{ Sphérique}(60, 40, 7) + 0.7 \text{ Cubique}(40, 30, 3.5)$, la première chiffre dans la parenthèse représente la portée horizontale de N0, et la deuxième est celui de la portée horizontale N90 et le dernier est la portée verticale.

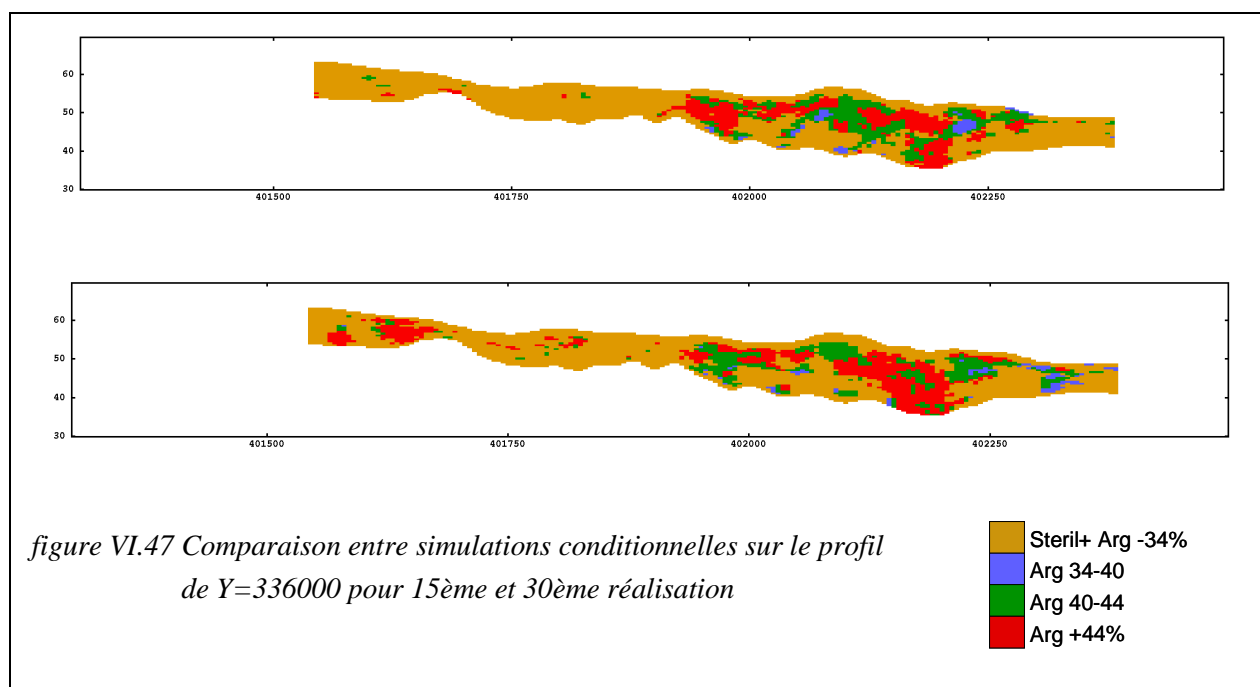






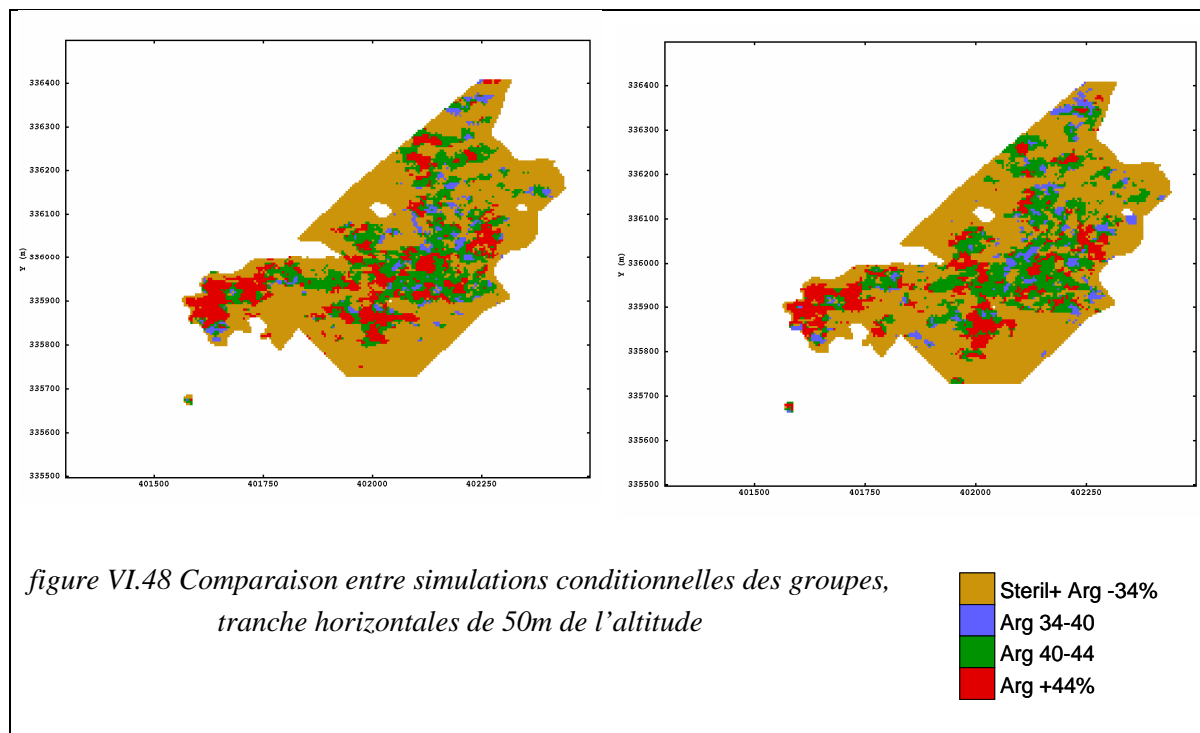
VI.8.4. Simulations des groupes

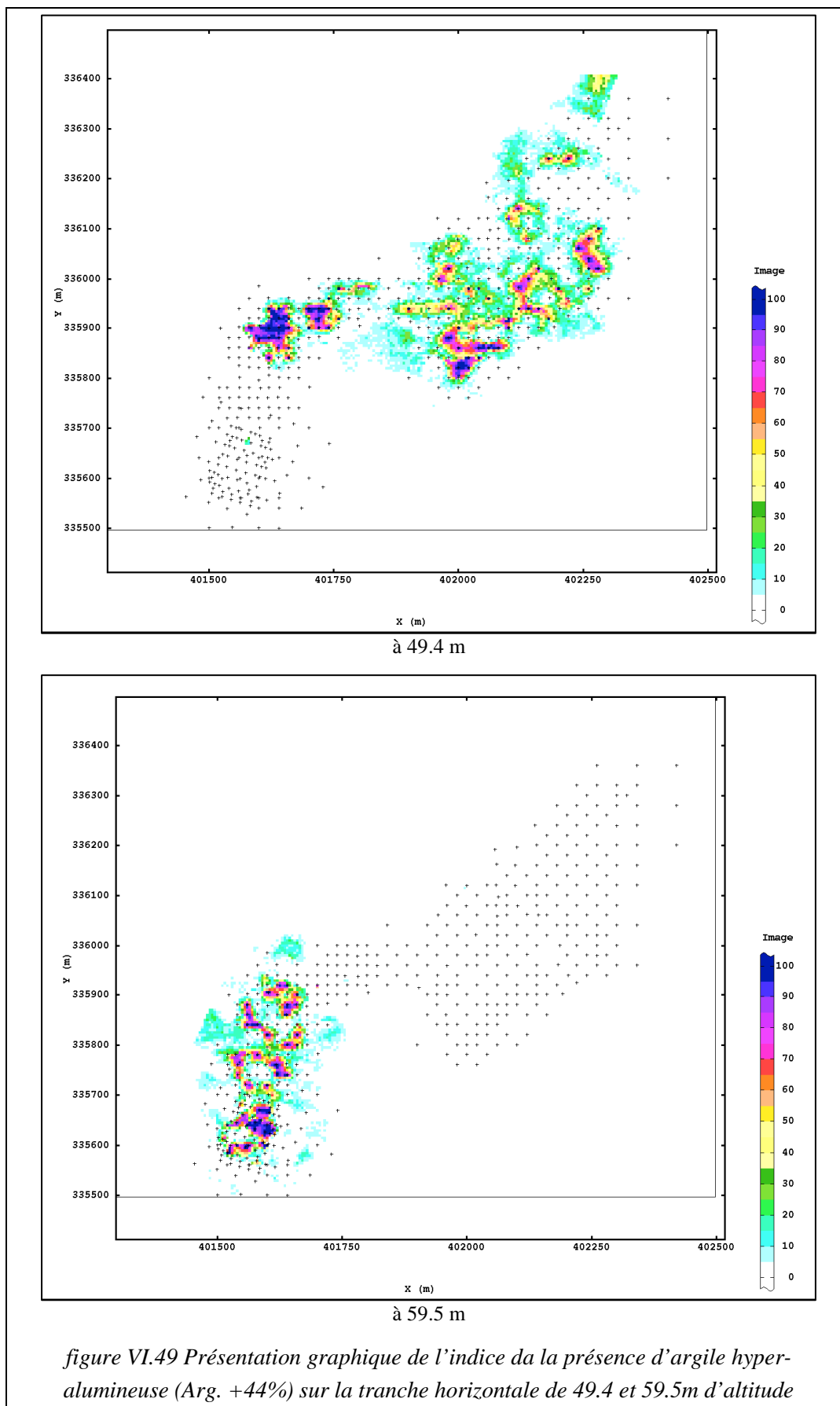
Les simulations conditionnelles reproduisent les principales caractéristiques des groupes dans la séquence kaolinique. On distingue la continuité latérale de couche d'argile, mais la qualité d'argile reste très variée. La figure VI.47 présente le résultat de deux réalisations de la simulation sur une coupe du gisement située au milieu du gisement BDR-NR. On constate une différence d'interpolation des groupes qui manifeste bien l'incertitude importante de l'interpolation par les classes de qualité.



On présente graphiquement, le résultat de simulation, sur deux réalisations de tranche horizontales de 50 m de l'altitude.

Pour chaque maille, la fréquence de la présence d'argile, est calculable sur toutes les réalisations de la simulation conditionnelle. On dispose 50 réalisations, donc approximativement, cette présence peut être évaluée comme un indice de probabilité des chaque groupe, on l'exprime au pourcentage, on le présente graphiquement, le résultat de simulation, sur deux réalisation de tranche horizontales de 50m de l'altitude (Pour avoir une stabilité statistique, normalement on utilise un nombre plus important de réalisation).





VI.9. Conclusion

On a décrit la capacité des simulations géostatistiques à quantifier le risque et l'incertitude. Dans la première partie les simulations des deux gisements kaoliniques ont permis de comparer l'impact du choix du critère de sélection sur la moyenne et l'écart-type des classes d'argile. Dans les deux cas le krigeage est mieux placé par rapport au PPV. Cela veut dire que l'utilisation des outils très simples de la géostatistique permet d'améliorer la qualité de la sélection dans les gisements.

La simulation des lithofaciès est une approche probabiliste de l'interpolation des différentes lithologies d'argile. Cet outil peut être également utilisé pour quantifier l'incertitude de la classification lithologique et souligner les interprétations possibles de l'interpolation.

La méthode de la simulation plurigaussienne donne des possibilités d'introduire des lois de contact entre les lithofaciès dans la simulation, cet outil se révèle parfaitement puissant pour ce genre d'application.

Une comparaison entre les deux séries de simulations souligne la grande importance de la désignation des surfaces de guidage dans l'interpolation des faciès.

L'utilisation de la qualité en tant qu'une variable catégorielle pour la simulation s'avère instable, car la valeur gaussienne ne sera pas en relation directe avec la teneur malgré le respect aux limites imposées. Pour ce genre d'utilisation la simulation directe de la teneur comme les résultats de la simulation de la première partie, peut être plus efficace. En tous cas les informations des contacts des différentes catégories peut être manifestement très intéressantes pour avoir une appréciation du risque de la dilution ou du mélange de classes très éloignées.

VII. CONCLUSION ET PERPECTIVES

VII.1. Conclusion

Les codes lithologiques, utilisés industriellement pour l'exploitation des gisements d'argiles kaoliniques du Bassin des Charentes, sont utiles pour une description sédimentologique des dépôts d'argiles, mais ils ne sont pas suffisamment précis pour être représentatifs des classes chimiques nécessaires à une grille de classifications de réserves.

On constate une variation significative de la composition lithologique des gisements au sein du Bassin des Charentes. Il en est de même de leurs compositions chimiques, les gisements situés au centre du secteur de Guizengeard, loin des bordures du bassin, se montrent plus riches en argile pierreuse et aussi en général plus riche en argile hyperalumineuse.

La moyenne et la variance d' Al_2O_3 (le premier critère de classement des réserves) à l'intérieur des codes lithologique varient selon le type du gisement : 3 ou 4 groupes principaux sont reconnaissables selon ces critères et la distribution de la teneur en Al_2O_3 ;

Dans les gisements ayant subi une altération plus avancée, marquée par la présence de gibbsite ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 46\%$), on observe un décalage de la moyenne de chaque lithologie vers les valeurs plus élevées. On observe aussi des formes bi ou multimodales de la distribution de la teneur en Al_2O_3 . Ceci montre que ce phénomène a une portée plus grande, et qui ne se limite pas seulement aux poches d'argile pierreuse. On observe également qu'une argile maigre située juste au dessous des argiles hyperalumineuses, peut aussi être enrichie en Al_2O_3 .

L'augmentation de la variance est le paramètre le plus important et le plus difficile à gérer. Pour l'exploitant, il n'est pas très difficile de s'adapter à une augmentation ou une baisse de la moyenne présumée pour chaque groupe lithologique mais il est difficile de s'adapter à une variation de variance.

La variation illite-kaolinite-gibbsite est la plus importante à l'échelle du bassin, et aussi à l'échelle des gisements. Une partie de la variation du MgO et du Fe_2O_3 est en liaison génétique avec la teneur en K_2O . Ces éléments sont les composants d'une illite sous forme de Phengite. Les teneurs en oxyde de titane, en Na_2O et P_2O_5 n'apparaissent pas significativement corrélées avec les autres variables et ni entre elles.

La méthode d'échantillonnage appliquée pose des problèmes pour la régularisation des données qui est un des premiers pas essentiels d'une étude géostatistique. L'impact de la méthode d'échantillonnage en segments de longueurs différentes est présenté, avec ses conséquences sur le modèle du variogramme expérimental obtenu.

La géostatistique, ayant été appliquée depuis longtemps pour l'estimation des gisements miniers, a prouvé sa capacité dans ce domaine. Mais l'application des outils géostatistiques dans le domaine des minéraux industriels n'est pas si fréquente et dans le cas du kaolin on rencontre rarement des études publiées. Les gisements du kaolin des Charentes malgré une apparence très continue, présentent des complexités au niveau de leurs géométries et de la répartition de la teneur à l'intérieur du dépôt qui conduit à différentes catégories d'argile. Les gisements contenant des argiles hyperalumineuses, de plus en plus fréquents et importants en termes de tonnage dans les réserves d'AGS, présentent des structures spatiales de moins en moins continues et de plus en plus complexes.

L'étude variographique sur quelques gisements de ce type a mis en évidence une différence sensible entre les modèles spatiaux de ces gisements. Malgré une certaine ressemblance entre la structure spatiale des variables entre les gisements de même type, en aucun cas on ne peut pas se dispenser de l'analyse structurale. La différence entre les deux zones du gisement de BDR, présentée en détail, en est

une preuve. Une autre étude sur la sensibilité de l'estimation au modèle du variogramme a été faite sur la zone densément échantillonnée de BDR. La comparaison entre les résultats d'estimation avec le modèle issu d'une étude variographique détaillée avec ceux issus du modèle par défaut utilisé par AGS, souligne une fois de plus la nécessité d'une étude statistique et structurale pour chaque cas examiné individuellement.

Les variables chimiques mesurées ne sont pas des variables additives. L'impact de cette propriété est étudié sur l'accumulation des données et sur un cas d'étude. Cette étude montre que tant que la valeur des échantillons reste très proche, l'estimation directe de ces variables apporte un biais faible dans l'estimation. Par contre, cela n'est plus le cas en présence locale et importante de matière organique.

L'estimation de la moyenne de l'épaisseur d'argile par tranche, donnant la moyenne de la teneur de la partie argileuse dans chaque tranche horizontale du gisement, est une méthode qui peut être convenable pour les exploitants. Elle leur permet en effet de gérer la limite sable-argile en respectant le taux de récupération estimé (la moyenne de l'épaisseur/ l'épaisseur de tranche) et en connaissant la teneur moyenne pour la partie exploitable.

La maille optimale de sondage dépend de la fonction de corrélation de la variable et de la précision exigée de l'estimation. En se contentant d'une précision de 1.5% d' Al_2O_3 , une maille de sondage de 40*40 sera suffisante pour les gisements les plus continus tels que Chierzac et St Georges, tandis que pour le Bois des Rentes la maille de sondage doit être plus serrée (au moins 20*20).

On utilisera le krigeage pour la classification des réserves de préférence à la méthode du plus proche voisin. Bien évidemment, la question de réserves récupérables n'est pas dans le domaine de la géostatistique linéaire et fait appel aux techniques de la géostatistique non-linéaire et de la simulation. Cette étude peut donc être complétée.

La simulation des lithofaciès est une approche probabiliste de l'interpolation des différentes lithologies d'argile. Cet outil peut être également utilisé pour quantifier l'incertitude de la classification lithologique et souligner les interprétations possibles de l'interpolation.

La méthode de la simulation plurigaussienne donne des possibilités d'introduire des lois de contacts entre les lithofaciès dans la simulation : cet outil se révèle particulièrement adapté pour ce genre d'application.

L'utilisation de la qualité en tant que variable catégorielle pour la simulation s'avère instable, car la valeur gaussienne ne sera pas en relation directe avec la teneur malgré le respect des limites imposées. Pour ce genre d'utilisation, la simulation directe de la teneur comme les résultats de la simulation de la première partie, peut être plus efficace. En tous cas, les informations des contacts entre différentes catégories sont manifestement intéressantes pour avoir une appréciation du risque de la dilution ou de mélanges de classes très éloignées.

VII.2. Perspectives

Vue l'utilité d'une connaissance géologique et géométrique fine des dépôts d'argile, pour améliorer la qualité de la production, une étude plus détaillée de la genèse des gisements et de la formation des différentes qualités du kaolin est nécessaire. On a essayé d'aborder cette question via une étude bibliographique des gisements similaires et des limites observées sur les carrières. Son étude détaillée pourrait être un sujet de recherche en soi. La formation de la gibbsite peut nous aider à mieux comprendre la relation spatiale entre les argiles hyperalumineuses et les autres faciès de kaolin.

Les problèmes de la qualité des produits issus du mélange d'argiles très riches en alumine et d'argiles de teneur moyenne (ou riche en potasse) appellent à une étude sur le comportement thermique d'un mélange gibbsite-kaolinite-mica-quartz. La formation des phases intermédiaires et la participation des composants bruts dans ces phases pourraient nous être utiles à mieux interpréter les propriétés physiques des produits issus d'un traitement thermique. Une observation des phases au MEB, en utilisant la plaque chauffante, pourrait être proposée.

Les codes lithologiques et les critères visuels sont utilisés à côté de la teneur mesurée sur l'échantillon le plus proche pour définir la destination (dépôt ciblé). Il paraît intéressant de confronter les appréciations des exploitants sur des échantillons définis, dans les conditions différentes d'humidité d'échantillon. Pour les exploitants, un gisement est composé de lentilles superposées avec une variation très faible à l'intérieur de chaque lentille. La variation la plus importante provient de la délimitation de ces unités, tandis qu'on tend à montrer une variation transitive de la teneur. Une campagne d'échantillonnage à faible distance serait très utile pour démontrer le changement transitif de la teneur et la distance sur laquelle un changement de la teneur devient important.

Comme exposé, la taille variable des échantillons pose des problèmes pour l'analyse statistique et pour le calcul géostatistique. Cette étude est effectuée principalement sur les données existantes de la base des données d'AGS. Une étude très limitée (sur un seul sondage) compare les résultats d'une analyse détaillée avec celle qui est issue de la méthode courante d'AGS. Une étude plus vaste peut être réalisée afin de montrer la sensibilité à la taille des échantillons et à l'analyse des échantillons moins riches situés en bordure de dépôt.

On n'avait pas à disposition la teneur moyenne réalisée de blocs exploités. Il n'était donc pas possible de mesurer l'efficacité des méthodes proposées en utilisant la comparaison de la teneur estimée avec la teneur réalisée. Cela provient d'une part de la forme indéfinie de zone d'exploitation, et d'autre part, du mélange des matières exploitées dans les dépôts ciblés avant leur envoi à l'usine. Une étude comparative peut mettre en lumière une éventuelle erreur de classification des argiles.

Par souci de simplicité et pour l'utilité de cette démarche pour l'industrie, on n'est pas entré dans des calculs plus complexes de géostatistique. L'estimation via le cokrigage semble un des sujets abordables dans le cas de l'estimation de certains éléments des gisements de kaolins des Charentes.

Il reste des améliorations à apporter du point de vue informatique pour faciliter la tâche de l'estimation : modifications de liens entre les tables de bases de données, indépendance de la table des teneurs, de la table des logs lithologiques. Il serait souhaitable qu'un échantillon puisse être décrit avec plus de détails géologiques (composé de deux lithologies différentes), ou que la possibilité soit donnée d'analyser une lithologie épaisse par plusieurs échantillons. La définition des surfaces limites du gisement se fait manuellement et via des sections parallèles et est peu manipulable sur de grandes distances. Une partie de ce travail peut être automatisée via des algorithmes d'interpolation et la manipulation de points repères.

L'interprétation/modélisation de dépôts par les méthodes basées sur la simulation des objets, nécessite la connaissance suffisante de la forme et de la taille des objets (au moins la loi de distribution statistique des paramètres de taille et de forme). Comme on l'a déjà proposé, une étude préalable sur ce sujet sera nécessaire. Les méthodes utilisées pour la simulation des réservoirs d'hydrocarbures pourraient être adaptées pour la simulation des faciès lithologiques dans les gisements d'argile.

A. INTRODUCTION A LA GEOSTATISTIQUE

Destinée au lecteur non familier de la géostatistique linéaire,
cette annexe en présente les concepts principaux.

A.1. Introduction générale

Le problème fondamentale qui se pose au mineur, lorsqu'il a reconnu un gisement à partir d'un certain nombre de sondage et de travaux miniers, et qu'il a procédé, à partir de ces données, à l'évaluation de tonnage de minerai et de métal, et de la teneur moyenne de son gisement, c'est de savoir avec quelle précision l'estimation qu'il fait représente la réalité (Matheron 1962).

Avant la naissance de la géostatistique minière, cette discipline utilisait seulement les outils les plus rudimentaires des statistiques. Le composant statistique de la décision pour établir une mine a été typiquement basé sur le prélèvement du dépôt (parfois biaisé à cause de l'échantillonnage plus dense d'affleurement). Plus souvent, la moyenne de la teneur des échantillons multiplié par le volume estimé de masse minérale était utilisée comme la méthode d'évaluation. Cela n'est pas une évaluation très bonne de la ressource récupérable. En plus l'écart type des échantillons ne donne pas une image très bonne (c.-à-d., de la variabilité locale spatiale de petite taille) dans tout le corps minéralisé. Et c'est cette variabilité locale qui fait marcher ou mettre en péril une entreprise minière.

Contrairement à ce que l'on croit en général, un tel problème ne révèle pas de la statistique pure. La raison en est qu'une teneur, par exemple, est une variable régionalisée et ne pas une variable aléatoire. Étant donné le caractère de pseudo continuité d'une variable régionalisée, nous devons nous attendre à ce que la précision de l'estimation de mineur dépende, non seulement du nombre de échantillons prélevés, mais avant tout de leurs formes et de leurs dimensions et de leurs positions respectives, c'est-à-dire de la géométrie des travaux miniers effectués.

On ne peut pas songer à formuler un tel problème qu'à la condition de disposer d'un outil conceptuel et mathématique capable de caractériser de façon simple la propriété spécifique d'une distribution régionalisée (Matheron 1962).

A.2. Histoire de la géostatistique

Un sujet se développant rapidement tel que la géostatistique souvent ne prend pas beaucoup de temps à examiner ses origines. L'origine de la géostatistique a été citée brièvement dans les bouquins de la géostatistique (Journel et Huijbregts 1978, Clark 1979, David 1982, Isaaks et Srivastava 1989, Armstrong 1998, Chilès et Delfiner 1999) et Cressie (1990) a publié un article sur l'origine du krigeage.

La géostatistique est plus vaste que la technique d'estimation du krigeage. Mais l'histoire de la géostatistique est liée à l'estimation des gisements exploités en Afrique du Sud. Donc, l'utilisation du mot krigeage (technique de l'estimation de la géostatistique) dans le domaine de statistique spatiale est devenue synonyme de la prévision optimale dans l'espace, en utilisant des observations prises aux voisinages des endroits connus.

Dans les années 40, les gisements d'or de l'Afrique du Sud employaient avec précision la moyenne de la teneur des échantillons voisins à estimer la teneur moyenne dans un bloc d'exploitation. Au début des années 50, D.G. Krige a apporté une grande contribution au sujet en notant trois défauts fondamentaux dans cette technique.

D'abord la distribution des données d'analyse d'or est log-normale, ce qui nécessite une transformation à une distribution normale pour calculer la moyenne et une back-transformation pour en déduire la teneur du bloc. En second lieu, la variabilité de la teneur de bloc est considérablement moins variable que la de la teneur des carottes échantillonnées. Cela veut dire qu'il y a un effet dû au changement de taille (support). Troisièmement, la teneur de bloc et la teneur des carottes échantillonnées sont corrélées, ce qui devrait être exploité pour avoir une meilleure prévision. Krige propose la façon dont la

régression peut améliorer la prévision, dans un contexte d'extraction minier. À ce moment-là, les ingénieurs des mines étaient plus concentrés à la correction sur moyenne de la teneur estimée. En ignorant la cause de cette différence dans la variation entre les blocs et les échantillons, ces corrections étaient dans le faux sens.

Dans les années 50, des ingénieurs des mines sud-africains faisaient des calculs pour évaluer les ressources d'un gisement à partir d'un petit nombre de sondages répartis dans le domaine d'étude. Dans ce contexte, la quantité d'intérêt (la réserve totale disponible) était inconnue et traitée comme une variable aléatoire. Mais il était impossible d'assimiler les teneurs mesurées aux différents sites sondés à des réalisations de variables aléatoires indépendantes. On sent bien que cette solution d'utilisation de la moyenne mobile à quelque chose de sous-optimal, en particulier il semble souhaitable d'utiliser une méthode qui donne plus de poids aux sites proches qu'aux autres points de mesure.

Cette théorie a ensuite été développée pendant les années 60 par Georges Matheron. De 1954 à 1963, lors de son passage au Bureau de Recherches Géologiques et Minières en Algérie et en France, il découvrit les travaux pionniers de l'école sud-africaine (Krige, Sichel, de Wijs) consacrés aux mines d'or du Witwatersrand et élaborera à cette occasion les concepts majeurs de la géostatistique, théorie pour l'estimation des ressources naturelles. Ces premiers travaux trouvent leur aboutissement par la publication de deux ouvrages (Mémoires du BRGM) :

Le monumental traité de géostatistique appliquée (Editions Technip, France, 1962-63), où sont définis les outils fondamentaux de la géostatistique linéaire : variographie, variance d'estimation et variance de dispersion, krigeage, appelé ainsi d'après les contributions de l'ingénieur sud-africain Daniel Krige (on pourra consulter l'article de l'Encyclopédie Universalis consacré à cette théorie), Un livre plus théorique, sa thèse, intitulé Les variables régionalisées et leur estimation : une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature, publié par Masson en 1965.

Selon Chauvet (1999), l'évolution de la Géostatistique au sein de l'Ecole française peut être résumée par les trois étapes suivantes ;

La première étape est d'inspiration exclusivement minière. Pour être plus précis, ce sont les problèmes rencontrés par les mineurs d'or d'Afrique du Sud qui suscitent les premières recherches.

Avec le second âge de la Géostatistique, que l'on peut situer de 1965 à la fin des années 1970, c'est la référence à des modèles statistiques qui est abandonnée. Ou bien on élabore des modèles qui ne font pas intervenir les lois de distribution (Géostatistique Linéaire), ou bien on se ramène préalablement à des modèles de référence par le jeu des anamorphoses. Parallèlement, on cherche à élargir les hypothèses de travail : c'est le développement d'une Géostatistique Non Stationnaire, puis d'une Géostatistique Non Linéaire.

Il n'est pas facile de parler de la Géostatistique de troisième génération, en pleine expansion. Dans un contexte informatique de plus en plus confortable, la Géostatistique se développe dans les directions les plus variées. Les champs d'application ne se limitent plus désormais aux ressources naturelles comme les mines ou le pétrole.

A.3. Langage de la géostatistique

La géostatistique s'intéresse à des grandeurs telles que teneurs, puissances, accumulations, surfaces et volumes minéralisés, etc., qui sont considérées comme des variables régionalisées caractérisées par un support (échantillon, coupe) dans un champ (le gisement). Le rapport dimensionnel support / champ varie dans de larges dimensions suivant le phénomène étudié, on observe expérimentalement que la dispersion de la variable régionalisée est fonction inverse du rapport support / champ. Les variables régionalisées sont le reflet des effets superposés de multiples phénomènes physico-chimiques et de ce fait ont des variations parfois très brutales qui leur donnent un caractère apparemment aléatoire, alors qu'elles ne sont

pourant pas indépendantes : deux points proches ont des valeurs "corrélées", la corrélation diminue lorsque la distance augmente et s'annule au delà d'une certaine portée.

Les variables régionalisées peuvent être représentées par des "fonctions aléatoires" c'est à dire une famille de fonctions telles qu'une probabilité de réalisation soit associée à chaque membre de la famille.

L'hypothèse de départ est que la distribution de la grandeur étudiée dans le gisement est une réalisation particulière $z(x)$, résultant d'un tirage au sort, d'une fonction aléatoire $Z(x)$. La valeur de la variable en un point x_0 est la fonction aléatoire $Z(x_0)$ dont la réalisation particulière est $z(x_0)$.

Une deuxième hypothèse permet de raisonner à partir de la réalisation particulière observée : on admet que le phénomène observé est homogène dans l'espace étudié, ce qui s'exprime en disant que la dispersion du phénomène obéit dans tout le champ à une même loi de dispersion intrinsèque ou absolue, ou encore que la fonction aléatoire $Z(x)$ est stationnaire.

En Géostatistique d'estimation on ne considère que les deux premiers moments de cette fonction, qui doivent être invariables par translation dans tout l'espace de définition. On est généralement réduit à accepter une "quasi-stationnarité" : stationnarité locale et faible dérive.

Le moment d'ordre 1 est la moyenne (espérance mathématique)

$$E(Z(x)) = E(Z(x+h)) = m \quad \text{ou} \quad m(h) = \text{cte}$$

Le moment d'ordre 2 peut être exprimé de plusieurs façons :

$E[Z(x) \cdot Z(x+h)] - m^2 = C(x, h)$, fonction unique dans tout le domaine (le gisement), exprimant la covariance qui peut se définir:

$$C(x, h) = E[(Z(x+h) - m(x+h))(Z(x) - m(x))]$$

On définit également le (semi)-variogramme (fonction liée à la fonction covariance) :

$$\gamma(h) = 0.5 \cdot \sigma^2(h) = 0.5 \cdot E[Z(x+h) - Z(x)]^2$$

Remarque : Les massifs rocheux et en particulier les gisements sont très souvent anisotropes. La stationnarité est relative à une direction de translation (n est un vecteur). Si covariance et variogramme correspondant aux directions principales sont respectivement peu différents, on adopte généralement une valeur moyenne en considérant l'espace comme isotrope.

A.3.1. Support des observations

Dans la pratique, $Z(x)$ ne sera jamais mesuré sur un support ponctuel mais sur un support physique relativement très petit par rapport à la taille du gisement (disons v avec $v \ll G$). Il est de toute première importance de s'assurer que toutes les observations proviennent de supports identiques. Pour les gisements des Charentes, la carotte d'un diamètre de 63.5 mm (Type HQ), est échantillonnée sur une maille de 20m*20m dans le stade d'estimation. Ce qui représente un rapport d'environ 1 à 126000.

En effet, les statistiques habituelles calculées sur des supports différents n'ont aucun sens physique précis.

A.3.2. Deux problèmes complexes

L'exemple précédent illustre l'importance de tenir compte du support sur lequel s'opère la sélection lors de l'exploitation. On reconnaît donc un premier problème : l'information dont on dispose est définie sur de petites unités échantillonnées (carottes, échantillons en vrac, cannelures). Comment, à partir de cette information, prédire ce que sera la distribution d'unités de sélection d'un volume très supérieur ?

Supposons que l'on connaisse la loi de distribution des teneurs des blocs. On peut calculer, comme on l'a fait à l'exemple précédent, les réserves récupérables en fonction des différentes teneurs de coupure. Ces réserves calculées correspondent à ce que nous obtiendrions si l'on connaissait effectivement la vraie teneur de tous les blocs du gisement. En pratique, ces vraies valeurs ne sont jamais connues et doivent

être estimées à partir de l'information disponible. Quel estimateur choisir ? Quelle quantité d'échantillonnage effectuer ? Peut-on prédire maintenant ce qui sera effectivement récupéré plus tard à partir d'une quantité d'information supérieure ?

Ces deux problèmes sont fondamentaux en géostatistique, on leur a donné un nom: l'effet de support et l'effet d'information (Marcotte, cours de la géostatistique minière).

A.3.2.1 Effet de support

En géostatistique, le terme de « support » désigne la taille et le volume d'un échantillon ou d'un bloc. Ici, les échantillons ont un support de 1×1 , tandis que les blocs possèdent un support de 2×2 . En général, le support des échantillons est plus petit que celui des blocs.

L'effet support indique que la distribution des teneurs dépend de la taille des blocs que l'on considère. Ainsi pour un même tonnage extrait et supposant que l'on connaisse les vraies valeurs des blocs, on retire toujours plus de métal si la sélection s'effectue sur de petits blocs plutôt que sur des gros blocs (l'opération sur de petits blocs est plus sélective). L'effet information indique que l'on ne dispose pas des vraies teneurs des blocs qui nous intéressent mais seulement d'une estimation de celles-ci. Pour un même tonnage extrait, la sélection s'effectuant sur des blocs d'une taille donnée, on récupérera toujours moins de métal avec un estimateur qu'avec les vraies valeurs. Normalement plus on améliore l'estimateur, soit en recourant à de meilleures méthodes d'estimation, soit en augmentant le nombre de données, plus on retire de métal pour un même tonnage.

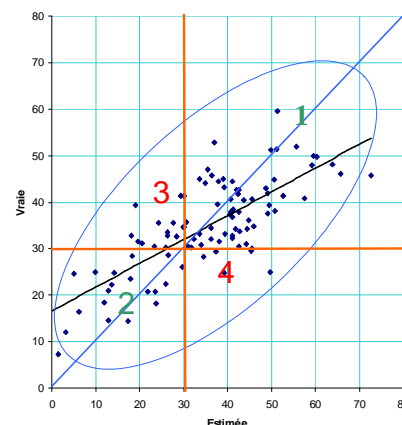
La méthode polygonale, en prenant pour teneur d'un bloc la teneur d'un échantillon, substitue à l'histogramme des blocs celui des échantillons - même s'ils sont très différents. Ceci explique la mauvaise performance de cet estimateur dès qu'on s'intéresse à la sélectivité, c'est-à-dire lorsque l'on veut savoir si la variable régionalisée dépasse un certain seuil. Tout bon estimateur se doit de prendre en compte la différence entre le support des échantillons et celui des blocs à estimer, c'est-à-dire l'effet de support.

A.3.2.2 Effet d'information

L'effet d'information est relatif à notre manque d'information au moment précis où nous devons faire un choix entre les blocs de minerai et les blocs « stériles ». Nous disposons seulement d'estimations des teneurs des blocs, et non des teneurs réelles. On peut faire un graphique représentant les teneurs réelles (axe des ordonnées) en fonction des teneurs estimées (axe des abscisses) pour les trois différentes méthodes d'estimation. Pour l'estimateur idéal, les teneurs estimées seraient égales aux teneurs réelles, si bien que tous les points seraient situés sur la première diagonale. Malheureusement ce n'est pas le cas.

Lorsqu'on choisit des blocs à exploiter, tous les blocs dont la valeur estimée est supérieure au seuil fixé sont considérés comme du minerai. Pour représenter ceci graphiquement, on a dessiné une droite verticale d'équation $X = 30$. Les blocs situés à droite de cette ligne sont sélectionnés pour être exploités.

figure A.1 Nuage de corrélation, teneur estimée et teneur vraie. Les quatre zones de la justesse de la décision minéral/stérile à partir d'un seuil de teneur.



Ce que nous voulions en fait, ce sont les blocs dont la teneur réelle est supérieure à 30, c'est-à-dire les blocs situés au-dessus de la droite horizontale d'équation $Y = 30$. On a ainsi séparé le plan en quatre zones :

- Teneur réelle > 30 et teneur estimée > 30 : ces blocs de minerai ont été à raison considérés comme du minerai (figure A.1, zone 1).
- Teneur réelle < 30 et teneur estimée < 30 : ces blocs stériles ont été à raison considérés comme stériles (figure A.1, zone 2).
- Teneur réelle > 30 et teneur estimée < 30 : ces blocs de minerai ont été à tort considérés comme stériles. Cette erreur d'estimation représente un manque à gagner pour la mine (figure A.1, zone 3).
- Teneur réelle < 30 et teneur estimée > 30 : ces blocs stériles ont été considérés à tort comme du minerai (figure A.1, zone 4).
- Cette erreur d'estimation n'empêche en rien le type d'erreur précédent et constitue aussi un manque à gagner pour la mine.

Nous avons donc vu que l'effet d'information et l'effet de support étaient deux causes d'erreur importante lors de la prévision des réserves. Nous en savons maintenant plus sur les propriétés à exiger d'un estimateur. On peut voir que la pondération des données dans le voisinage des blocs à estimer est importante. La première partie de ce cours traitera du variogramme. Il s'agit d'un outil statistique permettant d'évaluer la similarité des teneurs de deux échantillons en fonction de la distance séparant ces échantillons. Dans la seconde partie du cours, le variogramme permettra de calculer les pondérations optimales à considérer pour estimer un bloc ou un point (krigeage).

Un problème très important relié à l'effet information et à l'effet support est le problème de biais conditionnel. Très souvent, pour un tonnage extrait donné, on aura retiré beaucoup moins de métal que ne le prévoyait l'estimation, ce qui risque d'être ruineux pour la compagnie minière. Pour minimiser ce biais conditionnel, il faut utiliser des estimateurs qui tiennent compte à la fois de l'effet support et de l'effet information. C'est ce qui fait le krigeage.

A.4. Variogramme expérimental

L'idée fondamentale du variogramme est basée sur le fait que la nature n'est pas entièrement « imprévisible ». Deux observations situées l'une près de l'autre devraient, en moyenne, se ressembler davantage que deux observations éloignées.

Cette notion expérimentalement est connue chez exploitant des ressources naturelle, ce qu'on l'appelle la notion de "continuité" de la minéralisation.

La géostatistique a des visées très modestes. On veut estimer des paramètres statistiques à partir des données et non imposer un modèle à priori qui aurait toutes les chances de s'avérer inadéquat. On cherche à trouver le modèle qui révèle les données (le variogramme expérimental), on le modélise et finalement on l'applique sur le champ des données.

A.4.1. Calcul du variogramme expérimental

Avant aller plus loin, on explique ici, la définition mathématique du variogramme expérimental, et les paramètres à définir pour le calculer.

A.4.1.1 Définition mathématique

Le variogramme expérimental est une estimation du variogramme, on calcule le variogramme expérimental à l'aide de :

$$\gamma_e(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

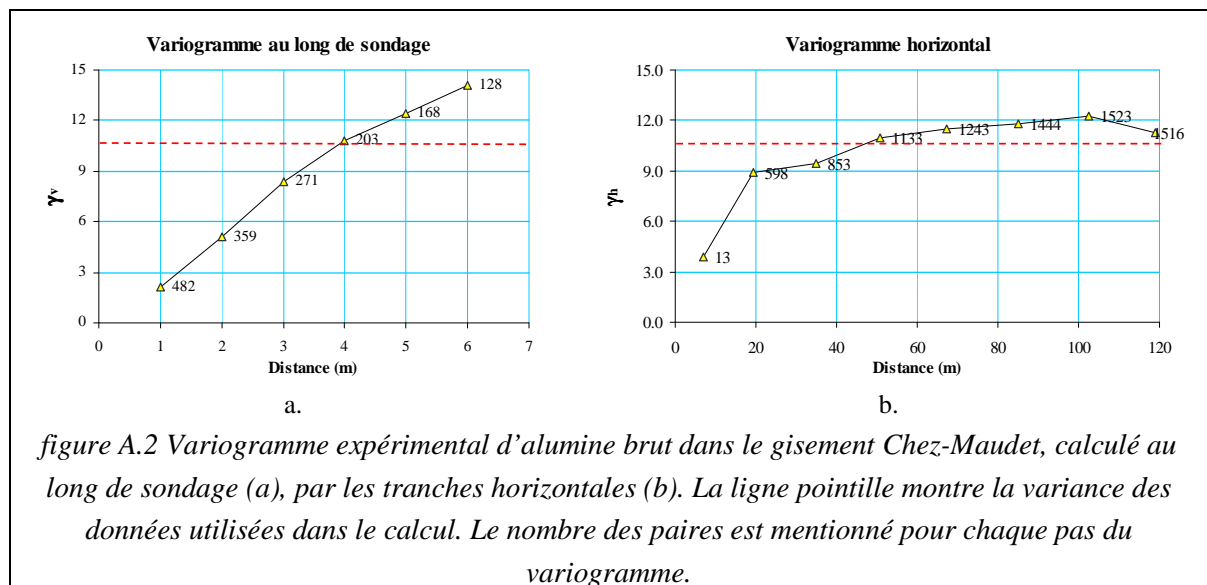
où N(h) nombre de paires dont les points sont espacés de h et Z (xi)-Z (xi+h) est l'écart entre leur valeur, de la teneur par exemple.

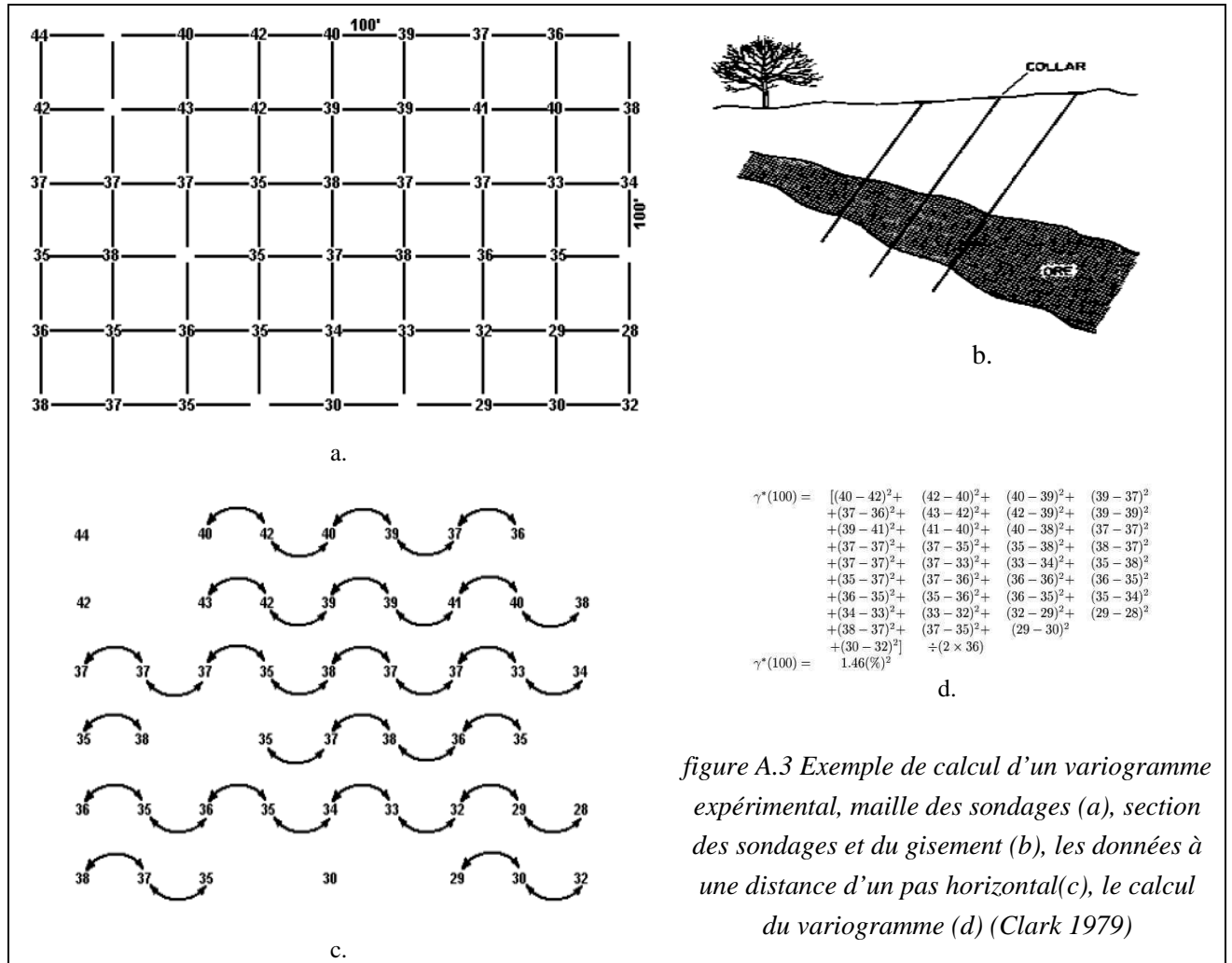
Clark (1979) utilise un exemple pour expliquer la façon du calculer le variogramme, on cite ici, cet exemple (figure A.3), les sondages sont faites sur une maille régulière d'une dimension de 100m, il y a quelques sondages manqués sur cette maille, On divise la somme des carrées des écarts par 2 fois de nombre des paires, dans des certains références géostatistique, on l'appel le « semi-variogramme », dans ce document on utilisera l'expression du variogramme à la place du semi-variogramme.

Pour un champ donné, rien n'assure que la continuité soit identique dans toutes les directions. Par exemple, il se pourrait que des teneurs montrent une meilleure continuité parallèlement à la stratigraphie que perpendiculairement à celle-ci, donc on peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques.

La fonction la plus utilisée en géostatistique pour décrire la continuité de la minéralisation est le variogramme, le variogramme est une fonction mathématique qu'on ajuste sur le variogramme expérimental,

Cette fonction, habituellement croissante en fonction de h, synthétise beaucoup d'informations concernant le comportement conjoint des variables aléatoires et concernant "la continuité" de la minéralisation.





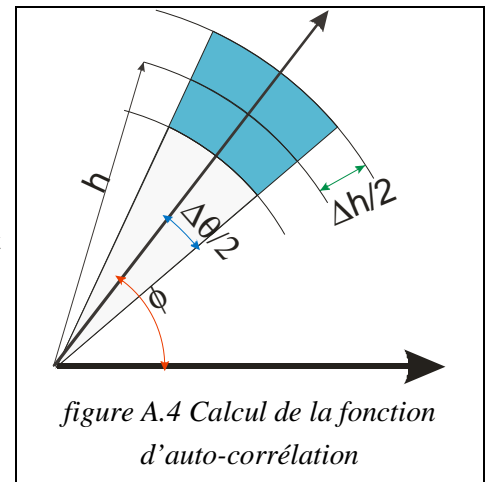
A.4.1.2 Paramétrage du calcul du variogramme expérimental

Le variogramme expérimental n'est qu'une estimation de la fonction auto-corrélation de la variable régionalisée étudiée. La forme lissée de cette fonction peut être obtenue par l'équation suivante :

$$\gamma^*(\phi, h) = \frac{1}{\Delta h \cdot \Delta \theta} \int_{-\frac{\Delta h}{2}}^{+\frac{\Delta h}{2}} \int_{-\frac{\Delta \theta}{2}}^{+\frac{\Delta \theta}{2}} \gamma(h+x, \theta+\psi) d\psi dx$$

Où :

h est la distance, et le ϕ est la direction du variogramme et $\Delta \theta$ et Δh sont la tolérance angulaire et la tolérance sur la distance



Comme on a vu précédemment, dans le calcul du variogramme expérimental on se contente d'utiliser seulement les données disponibles. Donc le variogramme expérimental est une estimation de cette fonction auto-corrélation. Choix des paramètres du calcul de variogramme est important pour avoir une approximation acceptable.

(a) Pas du variogramme

Pour calculer le variogramme expérimental, On définit des classes au long de l'axe de distance (axe horizontal du variogramme), chaque classe est centrée sur un multiple d'une longueur nommé pas du variogramme. Seulement les paires de points dont l'inter-distance égale à un multiple de ce pas (plus ou sans la tolérance sur la distance) sera maintenue pour des calculs.

(b) Tolérance du pas

La distance entre les points, en générale n'est pas toujours égale à un multiple du pas de variogramme, donc on accepte une tolérance de distance. Pour que tous les points participent au calcul la tolérance peut être choisie à 50% du pas de variogramme. La figure A.5.b montre les distances utilisées comme le pas de variogramme (lignes en rouge) et les limite de chaque pas en utilisant une tolérance de 50% (les lignes en bleu).

(c) Azimut et le pendage

Le variogramme peut être calculé dans une direction définie, cela veut dire que si le vecteur reliant des deux points d'une paire est dans la direction définie, la paire des données sera prise pour le calcul du variogramme. On définit la direction du variogramme par un azimuth et un pendage dans une espace 3D. Pour certains logiciels, la direction du variogramme doit être exprimée par 3 angles avec les 3 axes principaux.

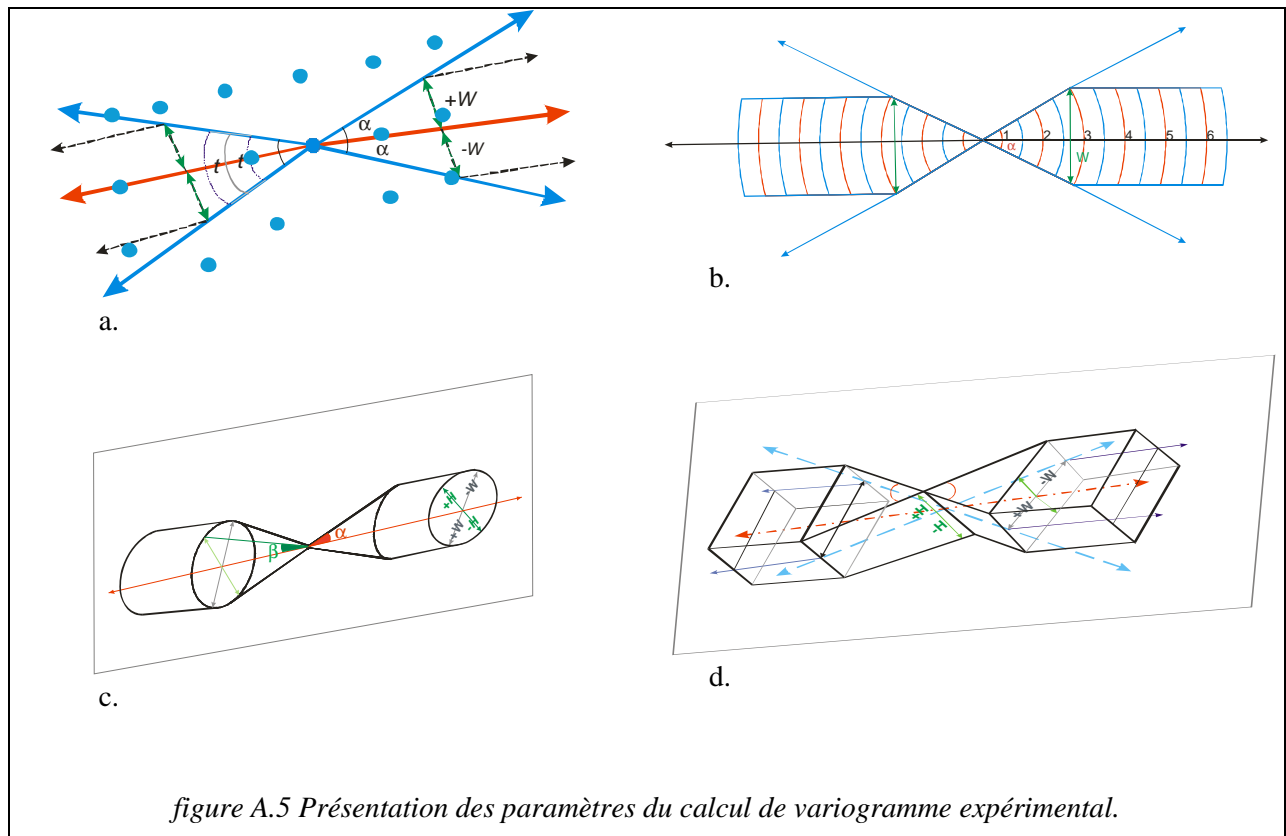


figure A.5 Présentation des paramètres du calcul de variogramme expérimental.

(d) Tolérance angulaire

Comme le cas du pas de variogramme, La tolérance angulaire fournit des moyens de considérer les points dans un secteur angulaire de la direction. Le secteur angulaire est égal à deux fois la tolérance (présentée par α dans la figure A.5.a).

(e) Largeur de bande

Pour une distance importante, où la tolérance angulaire ne suffirait pas pour limiter les paires des points pris en calcul, On limite le secteur en utilisant le maximum acceptable de la distance de l'axe de direction (présentée par W dans la figure A.5.a).

(f) Hauteur de tranche

Dans un espace 3D, peut on ajouter une tolérance angulaire par rapport au plan de direction et une largeur de bande (figure A.5.c) ou utiliser le découpage en tranche (figure 4.5.d). Les tranches représentent une bande le long de la direction. La valeur de la mi-hauteur de cette tranche est présentée par h dans la figure A.5.d.

A.4.2. Interprétation du variogramme

Lorsque les variogrammes montrent un palier alors on peut facilement établir le lien entre la valeur du variogramme pour la distance h et la covariance pour deux observations séparées de h .

Chaque phénomène géologique possède un variogramme qui lui est propre. Ainsi,

- Un gisement d'or présentera un variogramme erratique avec un fort effet de pépite et une faible portée.
- Un gisement de cuivre porphyrique montrera un variogramme linéaire à l'origine avec faible effet de pépite et grande portée.
- Un gisement sédimentaire présentera une portée plus grande parallèlement à la stratification que perpendiculairement à celle-ci (anisotropie géométrique).
- La topographie pourra présenter un variogramme très continu avec comportement parabolique à l'origine et absence d'effet de pépite.

Variogramme est un outil descriptif puissant utilisable dans une multitude de domaines. Dans le domaine minier, l'interprétation du variogramme nécessite une connaissance statistique des données et une vision de la genèse du gisement.

A.4.2.1 Quelques applications du variogramme :

L'étude de variogramme est l'une des parties les plus importantes de n'importe quelle étude géostatistique. Le variogramme est un outil nécessaire pour évaluation de réserve minéral par la méthode du krigeage. En outre, le variogramme peut fournir l'information au sujet de :

- La direction de la meilleure continuité dans la minéralisation.
- L'orientation et la taille des zones à haute teneur.
- L'espacement moyen entre les zones de minerai et les périodicités dans la minéralisation.
- La grève et l'immersion des zones de rupture et le plongeon de la minéralisation dans ces zones.
- La distance de l'influence d'un échantillon ou la distance au delà dont la similitude entre les valeurs est négligeable.
- La précision avec laquelle la minéralisation est connue au point où elle est prélevée.

En utilisant cette information, des réponses peuvent être données à certaines questions critiques comme :

- Quel est l'espacement optimal, l'orientation des sondages nécessaires pour accomplir un programme de forage ?

- Quel sera l'effet d'une méthode d'extraction fortement sélective, sur les tonnages et les teneurs extraits, par opposition à une méthode d'extraction en bloc à grande échelle ?
- Quelle méthode de prélèvement, y compris l'espacement d'échantillon, devrait être employée pour le contrôle de la teneur pendant la production ?

Des hypothèses au sujet de la genèse du corps de minerai peuvent être évaluées. En résumé, il y a très peu de dépôts où le processus de l'exploration et de l'évaluation ne peut pas être amélioré par des analyses variographique. En plus une telle analyse fournit un modèle quantitatif de la variabilité de la minéralisation qui peut être directement employée pour des calculs de réserve (Bideaux 1990).

A.4.3. Problèmes courants avec les variogrammes

A.4.3.1 Données extrêmes

Le variogramme étant une moyenne de différences au carré, il est clair que la contribution d'une donnée extrême peut être déterminante. Si la localisation d'une donnée extrême est telle qu'elle apparaît plus souvent dans certaines classes de distance que d'autres, alors le variogramme sera très bruité. Si elle est située en périphérie du domaine, elle introduira une tendance croissante sur le variogramme. Si elle est située au centre, elle introduira plutôt une tendance décroissante

A.4.3.2 Pas d'échantillonnage variable selon les zones d'un gisement

Manque des données d'une zone du gisement, perturbe le variogramme, du point de vue de calcul, les points proches de cette zone ne peuvent pas participer à tous les pas du variogramme, et en général, la variabilité de la zone manquée ne sera pas prise en compte.

A.4.3.3 Ré-échantillonnage des zones riches

Un problème semblable à celui rencontré précédemment survient lorsqu'on échantillonne préférentiellement à proximité des valeurs fortes que l'on rencontre (pour confirmer disent certains). Comme les distributions des teneurs des gisements typiques sont fortement asymétriques avec peu de valeurs fortes, les chances sont très grandes qu'une valeur forte ne soit pas "confirmée". On aura donc ainsi plusieurs valeurs fortes accompagnées de valeurs nettement plus faibles à proximité. Les seules paires de données à petite distance peuvent provenir précisément de ces ré-échantillonnages. Conséquemment, ceci aura pour effet de faire paraître la continuité spatiale beaucoup moins forte qu'elle ne l'est réellement.

A.4.3.4 Erreurs de localisation

Les erreurs de localisation viennent fausser les distances et donc fausser le variogramme expérimental. Ainsi, certaines paires à petites distances seront considérées comme à des distances plus grandes qu'elles ne le sont réellement et vice-versa. L'effet net est d'augmenter l'effet de pépite apparent sur le variogramme.

A.4.3.5 Systèmes de coordonnées géologiques

Une bonne connaissance de la géologie peut parfois permettre de définir un système de coordonnées plus naturel pour le phénomène étudié. Pour l'illustrer, imaginons un gisement de kaolin qui est déformé à cause d'un soutirage karstique. Les teneurs montreront une continuité spatiale dictée par ce phénomène. La transformation des coordonnées exige une très bonne connaissance géologique du phénomène et la possibilité des calculs sophistiqués. Certains logiciels (coûteux) incluent des fonctions pour effectuer cette transformation, mais faut savoir que cela existe.

A.5. Modélisation du variogramme

Les quatre principales opérations de la géostatistique linéaire, ne font appel qu'aux seuls moments des deux premiers ordres de la fonction aléatoire, espérance et covariance ou variogramme. Toute étude géostatistique est donc tributaire de l'élaboration d'un modèle d'autocorrélation (covariance ou variogramme), chargé de caractériser les traits majeurs de la structure spatiale de la variable régionalisée étudiée (Journel 1975).

A.5.1. Paramètres du variogramme

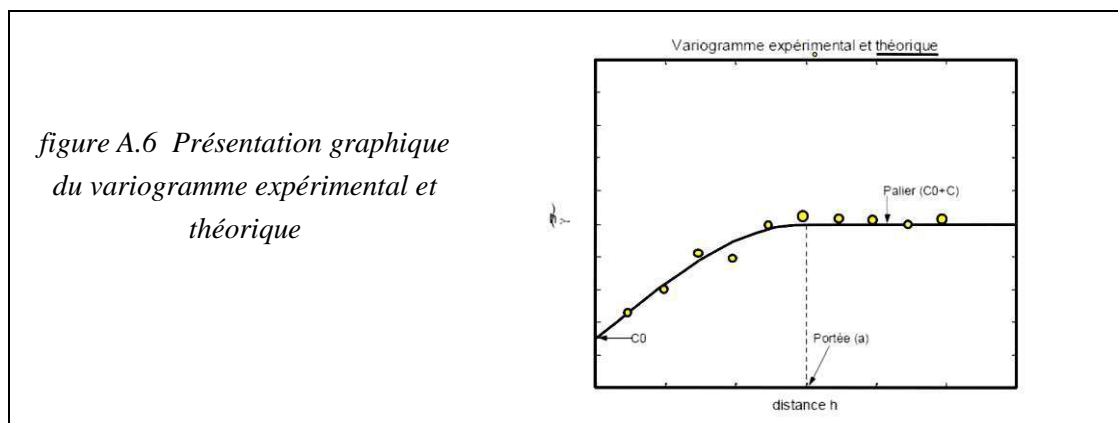
Les paramètres d'un variogramme sont les suivants :

i. Portée a : Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne, elles ne sont plus liées (covariance nulle) linéairement. À cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire (la variance totale calculer entre les échantillons).

ii. Palier : Variance de la variable aléatoire ($\text{Var}(Z(x))$)

iii. effet de pépité : C_0 : Variation à très courte échelle, erreurs de localisation, erreurs d'analyse et précision analytique. Donc on peut écrire la variance sous forme suivante

$$\sigma^2 = C_0 + C = \text{effet de pépité} + \text{Variance structuré}$$



A.5.2. Pourquoi un modèle

On utilise des fonctions mathématiques pour exprimer la relation entre la valeur du variogramme et la distance, autrement dit

$$\gamma = f(h), \text{ par exemple ; } \gamma(h) = 25 + 75 * (h/65) + 50 * (1 - \text{Exp.}(-h/100))$$

Il faut s'assurer que la variance de toute combinaison linéaire d'une variable régularisée (et stationnaire) soit positive, les fonctions qui peuvent assurer cette condition ne sont pas très nombreuses. On verra la liste de ces fonctions dans le paragraphe suivant, les modèles élémentaires sont très limités, mais on peut additionner plusieurs modèles élémentaires avec des coefficients positifs pour obtenir des modèles admissibles supplémentaires.

A.5.3. Modèles du variogramme

Les modèles sont des expressions analytiques que l'on tente d'ajuster le mieux possible aux points des variogrammes expérimentaux. Toute fonction ne peut être utilisée comme modèle. En géologie, les modèles les plus courants sont :

Effet de pépité, Sphérique (figure A.7), Exponentiel (figure A.8), Gaussien (figure A.9), Puissance (figure A.10), Cubique, Sinus cardinal.

On peut combiner plusieurs modèles en les additionnant. Ainsi, l'effet de pépite est presque toujours présent en association avec un ou plusieurs des autres modèles décrits plus haut. Il y a un lien étroit entre la nature de la variable étudiée et le type de modèle que l'on est susceptible de rencontrer.

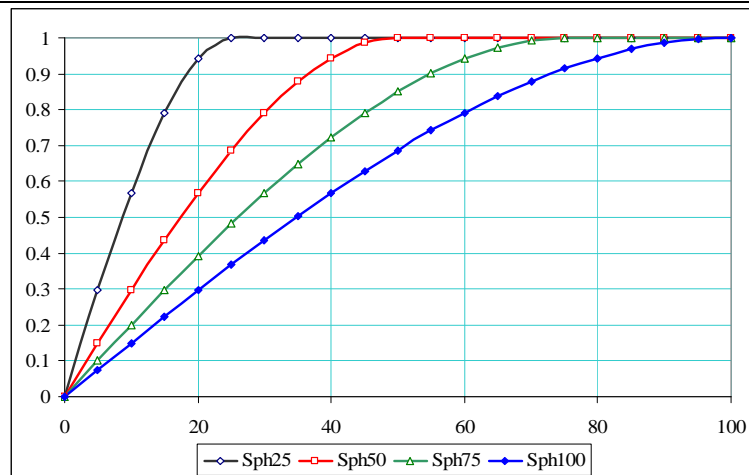


figure A.7 Allure des variogrammes du modèle sphérique

$$\gamma(h) = 1.5 * \frac{h}{a} - 0.5 * \left(\frac{h}{a}\right)^3$$

$$\gamma(h) = 1$$

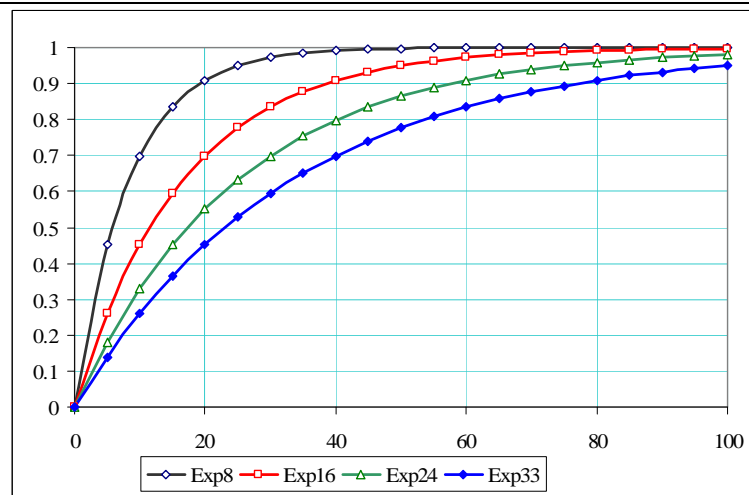


figure A.8 Allure des variogrammes du modèle exponentiel

$$\gamma(h) = 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right)$$

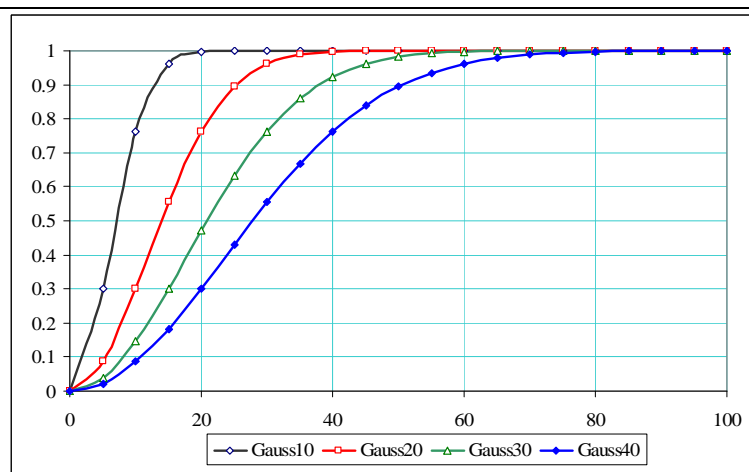
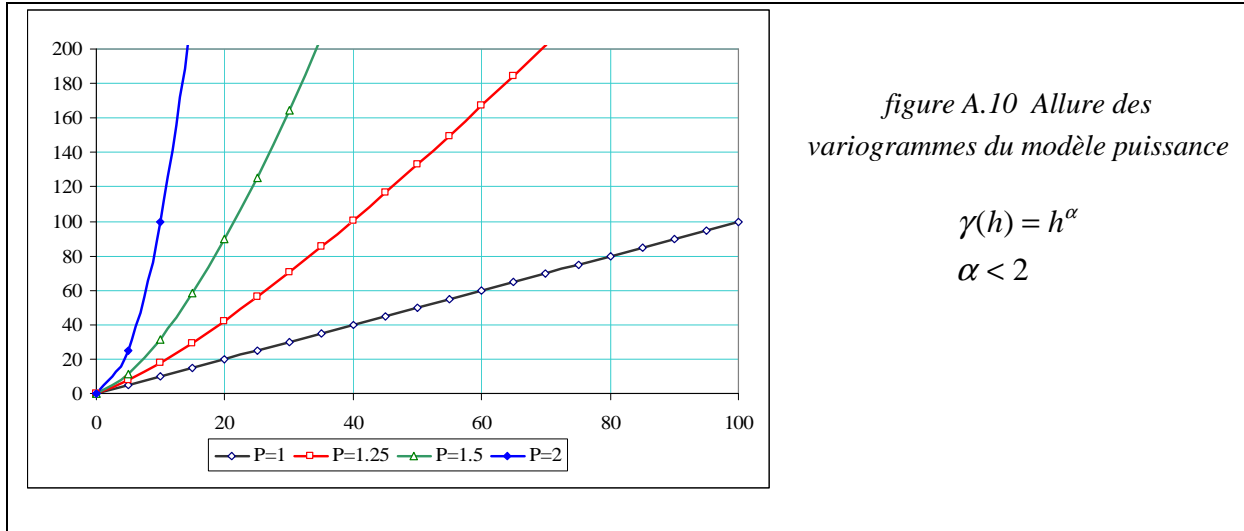


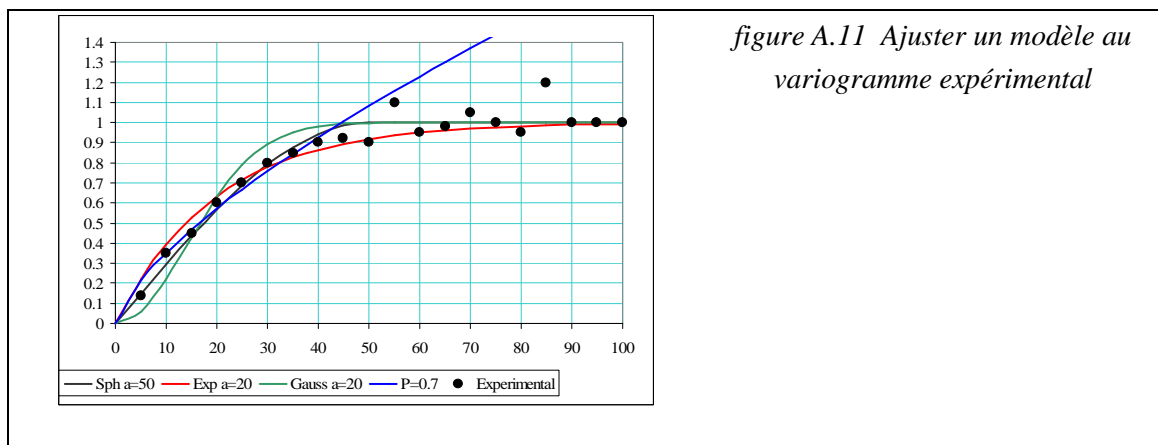
figure A.9 Allure des variogrammes du modèle gaussien

$$\gamma(h) = 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right)$$

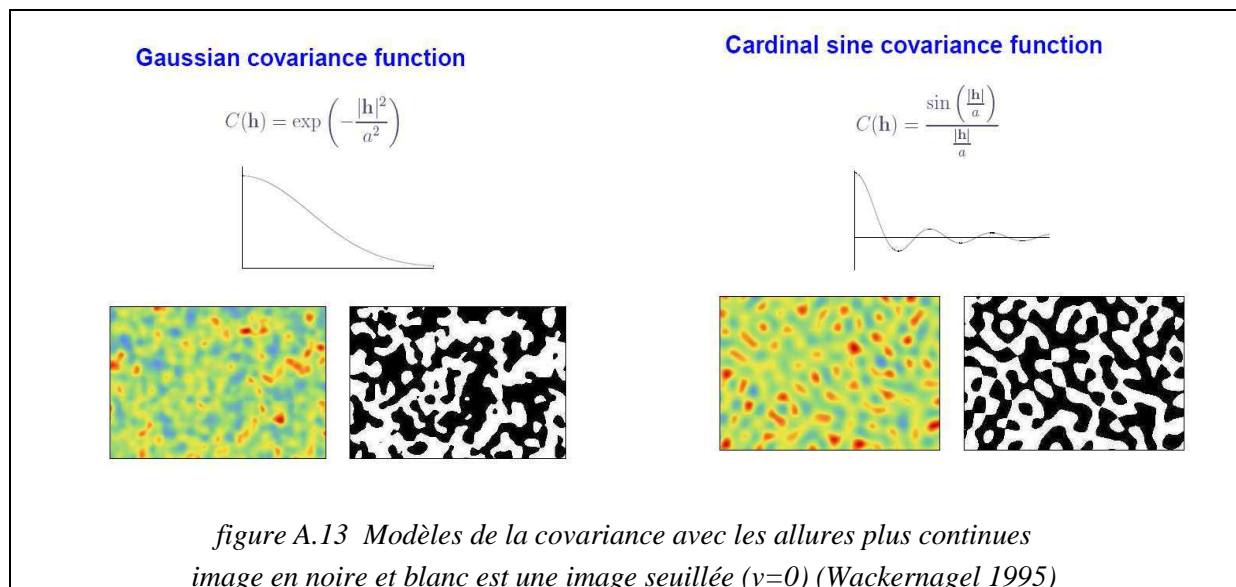
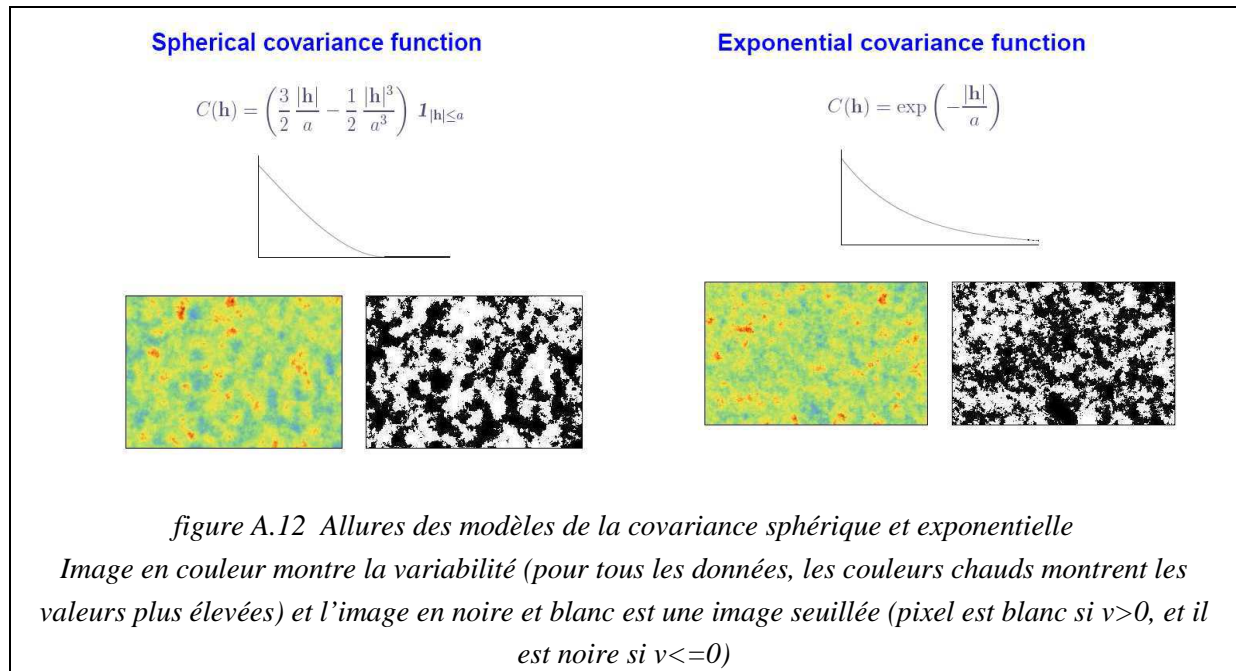


A.5.3.1 Ajustement d'un modèle au variogramme expérimental

Cette partie d'étude est connue sous nom de la modélisation du variogramme, il faut que la distribution des données (dont nous disposons) soit seulement notre estimation de la distribution vraie du gisement, le variogramme expérimental n'est qu'une estimation de la variation spatiale dans le gisement. C'est pourquoi l'ajustement du modèle n'est pas seulement un ajustement mathématique, la figure A.11 montre un variogramme expérimental et différents modèles qui peuvent être ajustés au variogramme expérimental.



On peut utiliser une combinaison linéaire de modèles élémentaires pour construire le modèle de variogramme approprié. Les figure A.12 et figure A.13 montrent les allures simulées par différents modèles de variogrammes, cette figure est assez parlante d'où la nécessité de la connaissance des comportements des modèles.



A.5.4. Anisotropies

La continuité spatiale n'est pas nécessairement la même dans toutes les directions. Comme c'est le cas pour un gisement du kaolin, le gisement présentant une forme lenticulaire; on peut avoir une meilleure continuité selon l'allongement principal des lentilles. Dans un gisement stratiforme, la meilleure continuité sera parallèlement aux strates que perpendiculairement. Pour les placers, on distinguera la meilleure continuité au long des paléochenaux que perpendiculairement.

Bien que dans la nature il existe une très grande variété d'anisotropies, en géostatistique, on ne peut pas modéliser aisément toutes les variétés d'anisotropie.

A.6. Variance de bloc

Décrit l'amplitude théorique des variations des teneurs de bloc pour un domaine infini. C'est l'analogue de la variance ponctuelle (palier du variogramme) pour des blocs. Cette notion n'est définie que pour les modèles de variogramme avec palier.

Variance de dispersion : décrit l'amplitude théorique des variations des teneurs de bloc à l'intérieur d'un domaine fini. La variance de dispersion peut s'obtenir à partir de la variance de bloc comme on le verra plus loin. Cette notion est définie même pour les variogrammes sans palier.

En termes de variogramme, utilisant la relation

$$C(h) = \sigma^2 - \gamma(h)$$

On obtient :

$$\sigma_v^2 = \sigma^2 - \bar{\gamma}(v, v)$$

Si on connaît le variogramme (ponctuel), et si celui-ci montre un palier, alors on connaît toutes les variances de blocs, peu importe la taille ou la forme des blocs. Les blocs peuvent être constitués de plusieurs portions spatialement non-contiguës.

On vérifie aisément de cette dernière expression que pour tous les modèles croissants de variogramme :

$$\begin{array}{ll} \text{si } v \rightarrow 0 & \sigma_v^2 \rightarrow \sigma^2 \\ \text{si } v \rightarrow \infty & \sigma_v^2 \rightarrow 0 \\ \text{si } v \uparrow & \sigma_v^2 \downarrow \end{array}$$

A.7. Variance d'Extension, d'Estimation, de Dispersion

La connaissance d'un gisement a pour objet des volumes de dimensions très différentes : caractéristiques quasi-ponctuelles d'un échantillon, de la production journalière d'un chantier, d'un bloc ou panneau d'exploitation, d'un corps minéralisé ou d'un ensemble de corps minéralisés constituant un gisement, éventuellement d'une province métallogénique.

La connaissance de la variabilité des caractéristiques présente un intérêt primordial pour toute évaluation ou planning de production.

A.7.1. Variance d'estimation

Dans cette section, on cherche à établir les résultats permettant de fournir une mesure de la précision des estimés effectués par une méthode d'estimation quelconque (linéaire).

Soit une v.a. Z_v que l'on veut estimer, d'une façon ou d'une autre, en formant une combinaison linéaire des valeurs observées en différents endroits, i.e.

Où:

Z_i : valeur observée au point x_i (v.a.)

Z_v^* : estimateur de Z_v

On définit l'erreur d'estimation :

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i$$

$$\begin{aligned} Var(e) &= Var(Z_v) - 2 Cov(Z_v, Z_v^*) + Var(Z_v^*) \quad \text{variance d'estimation :} \\ \sigma_e^2 &= Var(Z_v) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j Cov(Z_i, Z_j) - 2 \sum_i \lambda_i Cov(Z_i, Z_v) \end{aligned}$$

Substituant Z_v^* par son expression, en fonction des Z_i , donnée en (1), on obtient :

(2)

Qui peut être réécrit en fonction du variogramme :

$$\sigma_e^2 = 2 \sum_i \lambda_i \bar{\gamma}(x_i, v) - \bar{\gamma}(v, v) - \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j)$$

A.7.1.1

La variance de l'erreur du krigeage (pour être bref, on l'appelle par fois la variance du krigeage) d'un bloc peut être présentée par l'équation suivante :

Du rapport mentionné ci-dessus, il est évident que la grandeur du désaccord kriging dépende des facteurs suivants :

- les caractéristiques spatiales du dépôt comme elles sont représentées par leurs variogrammes ;
- la taille et la forme des blocs étant estimés ;
- le nombre d'échantillons utilisés en estimant un bloc ;
- les positions relatives des échantillons entre eux et aussi bien qu'en ce qui concerne le bloc ;

- la technique de l'évaluation utilisée.

On remarque bien que l'importance de la variance de krigeage n'est pas affectée par des valeurs réelles des échantillons utilisés, bien que les valeurs d'échantillon entrent dans le calcul des évaluations de bloc. Par conséquent, il est possible de déterminer a priori l'impact de placer un ou plusieurs trous additionnels de forat par la réduction des limites de fiabilité de l'évaluation globale.

A.7.2. Variance d'extension :

C'est la variance d'estimation obtenue lorsqu'on étend la valeur d'un point à une surface ou un volume ; la valeur d'un segment à une surface ou un volume. Par exemple, en évaluant un gisement, on "étend" à une "zone d'influence" les caractéristiques d'un échantillon... d'une façon plus générale on est amené à étendre les caractéristiques d'un volume v à un volume V .

Remarque :

- Les notions de "Variance d'Extension" et de "Variance d'Estimation" sont semblables :
- On parle d'Extension à partir d'un échantillon (point, volume) et d'Estimation à partir de plusieurs échantillons dispersés.
- L'Estimation peut être locale = évaluation des caractéristiques d'un point à partir d'un ou de plusieurs échantillons dans ce cas la variance est directement donnée par $2\gamma(h)$, = le variogramme (l'estimation locale conduit au tracé des isolignes).
- L'estimation peut être globale = évaluation des caractéristiques moyennes pour un volume important.
- La situation des échantillons doit permettre de calculer les variogrammes d'où l'intérêt de mailles régulières (carré, triangle équilatéral...)
- La Variance d'Estimation diminue lorsqu'on resserre la maille d'échantillonnage. Elle permet de chiffrer un intervalle de confiance pour l'Estimation en cause.

A.7.3. Variance de dispersion

Contrairement aux variances d'estimation qui permettaient de situer une valeur moyenne par rapport à son estimation, la variance de dispersion compare entre elles des caractéristiques vraies (inconnues) d'un volume V (abatage journalier par rapport à un panneau, ou panneau par rapport à un gisement).

La variance de bloc permet de calculer la variance théorique de la teneur de bloc dans un domaine d'extension infinie. Bien sûr les gisements réels ne sont jamais infinis et il est souhaitable de pouvoir prévoir l'amplitude des variations des teneurs de bloc pour un domaine fini correspondant au gisement ou à une partie du gisement.

A.8. Krigeage

La nécessité d'obtenir de meilleures prévisions à partir des données observées peut être trouvée dans toutes les disciplines scientifiques. Les notions statistiques de variable aléatoire peuvent faire ceci en exploitant la dépendance statistique dans les données et la variable aléatoire à prévoir. Il n'a alors rien d'étonnant que la meilleure prévision impartiale linéaire (BLUP/BLUE : Best Linear Un-biased Predictor/Estimator) souvent a été développée indépendamment dans différents secteurs scientifique, pour résoudre les problèmes particuliers actuels.

Matheron définit krigeage comme la suit : « Il consiste la prévision de la teneur d'un panneau en calculant la moyenne pondérée d'échantillons disponibles. Les poids appropriés a_i sont déterminés par la $\sum (a_i) = 1$, et la variance devrait prendre la plus petite possible valeur. Krige déduit sa propre perception du mot comme «la procédure de régression multiple pour arriver à la meilleure moyenne mobile pondérée linéaire non-bais d'un bloc du minerais, en assignant des poids optimums, à l'ensemble des données disponibles à l'intérieur et en dehors du bloc (Cressie 1990).

Nous avons choisi de ne travailler que sur des formes linéaires de la Fonction Aléatoire étudiée (Chauvet 1999). Cette contrainte nous est d'ailleurs imposée par nos choix antérieurs, puisque les outils probabilistes dont nous disposons (espérance et variance) ne sauront opérer que sur de telles formes compte-tenu de nos hypothèses de travail (stationnarité d'ordre 2 ou intrinsèque).

D'autrement dit, puisqu'on peut calculer la variance d'estimation pour tout estimateur linéaire, pourquoi ne pas choisir celui qui assure la variance d'estimation minimale. C'est précisément ce qu'effectue le krigeage. Dans le cas stationnaire, on en reconnaît 2 types principaux, selon que la moyenne du processus est connue ou non, soit le krigeage simple et le krigeage ordinaire. Ce dernier est, de loin, le plus fréquemment utilisé.

A.8.1. Méthodes du krigeage linéaire

A.8.1.1 Krigeage ordinaire

Supposons que l'on veuille estimer un bloc v centré au point x_0 . Notons Z_v la vraie valeur (inconnue) de ce bloc et Z_v^* l'estimateur que l'on obtient.

L'estimateur est linéaire, i.e.:

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i$$

Où les Z_i désignent les v.a. correspondant aux points échantillons.

On veut minimiser :

$$\sigma_e^2 = Var[Z_v - Z_v^*] = Var[Z_v] + Var[Z_v^*] - 2 Cov[Z_v, Z_v^*]$$

Substituant l'expression de l'estimateur dans cette équation, on obtient :

$$\sigma_e^2 = Var[Z_v] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j Cov[Z_i, Z_j] - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i Cov[Z_v, Z_i]$$

Pour que l'estimateur soit sans biais, il faut que:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

On a un problème de minimisation d'une fonction quadratique (donc convexe) sous contrainte d'égalité que l'on résout par la méthode de Lagrange. On forme le lagrangien :

Où μ est le multiplicateur de Lagrange. Le minimum est atteint lorsque toutes les dérivées partielles par rapport à chacun des λ_i et par rapport à μ s'annulent. Ceci conduit au système de krigeage ordinaire :

$$\begin{aligned} L(\lambda) &= \sigma_e^2 + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \\ &= \text{Var}[Z_v] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{Cov}[Z_i, Z_j] - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov}[Z_v, Z_i] + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \end{aligned}$$

Système de krigeage ordinaire

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \text{Cov}[Z_i, Z_j] + \mu = \text{Cov}[Z_v, Z_i] \quad \forall i = 1 \dots n$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

La variance d'estimation minimale, appelée variance de krigeage, est obtenue en substituant les équations de krigeage dans l'expression générale pour la variance d'estimation :

$$\sigma_k^2 = \text{Var}[Z_v] - \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov}[Z_v, Z_i] + \mu$$

Note : Cette variance de krigeage ne dépend pas des valeurs observées, elle ne dépend que du variogramme et de la configuration des points servant à l'estimation par rapport au point (ou bloc) à estimer.

Système de krigeage écrit en termes de variogramme :

Comme la variance d'estimation s'écrit aussi directement en termes de variogramme, on peut aussi écrire le système de krigeage en fonction du variogramme. Ceci tient au fait que $C(h) = \sigma^2 - \gamma(h)$ et que $\sum \lambda_i = 1$.

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - \mu = \bar{\gamma}(v, x_i) \quad \forall i = 1 \dots n$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{\gamma}(v, x_i) - \bar{\gamma}(v, v) + \mu$$

Il est intéressant de visualiser le système de krigeage ordinaire et la variance de krigeage ordinaire sous forme matricielle :

$$K_o \lambda_o = k_o$$

$$\sigma_{k_o}^2 = \sigma_v^2 - \lambda_o' k_o$$

$$K_o = \begin{bmatrix} \sigma^2 & \text{Cov}(Z_1, Z_2) & \bullet & \text{Cov}(Z_1, Z_n) & 1 \\ \text{Cov}(Z_2, Z_1) & \sigma^2 & \bullet & \text{Cov}(Z_2, Z_n) & 1 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \text{Cov}(Z_n, Z_1) & \text{Cov}(Z_n, Z_2) & \bullet & \sigma^2 & 1 \\ 1 & 1 & \bullet & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$k_o = \begin{bmatrix} \text{Cov}(Z_1, Z_v) \\ \text{Cov}(Z_2, Z_v) \\ \bullet \\ \text{Cov}(Z_n, Z_v) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \lambda_o = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \bullet \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix}$$

et $\sigma_v^2 = \overline{C}(v, v)$

A.8.1.2 Krigeage simple

Parfois on connaît la moyenne "m" du champ à estimer ou du moins on en possède un estimé fiable. On peut alors former un estimateur sans biais sans imposer la contrainte que la somme des poids soit égale à 1.

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) m$$

A.8.2. Propriétés du krigeage

Les principales propriétés et caractéristiques associées au krigeage sont:

Linéaire, sans biais, à variance minimale, par construction.

Interpolateur exact. : Si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue (le point de point connue sera égal 1 et le poids des autres point sera égal à 0).

Présente un effet d'écran : les points les plus près reçoivent les poids les plus importants. Cet effet d'écran varie selon la configuration et selon le modèle de variogramme utilisé pour le krigeage. Plus l'effet de pépité est important, moins il y a d'effet d'écran.

Tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux.

Par l'utilisation du variogramme, tient compte de la continuité du phénomène étudié (effet de pépité, anisotropie, etc.).

Effectue généralement un lissage, i.e. les estimations sont moins variables que les teneurs réelles (point ou bloc) que l'on cherche à estimer.

Presque sans biais conditionnel. Ceci signifie que lorsqu'on applique une teneur de coupure à des valeurs estimées, on récupérera approximativement la teneur prévue. C'est une propriété très importante pour les mines. Cette propriété implique que l'estimateur utilisé soit plus lisse que la valeur qu'il cherche à estimer, ce qui est le cas pour le krigeage.

Si l'on observe en un point une valeur coïncidant avec la valeur krigée pour ce point, alors les valeurs krigées en d'autres points ne sont pas modifiées par l'inclusion de ce nouveau point dans les krigeage. Par contre les variances de krigeage, elles, sont diminuées. De même, si l'on krige un certain nombre de points et que l'on utilise les valeurs krigées comme si c'étaient de nouvelles données, alors les krigeages subséquents ne s'en trouvent pas modifiés (sauf pour la variance de krigeage).

B. GLOSSAIRE

B.1. Statistique

ACP (Analyse en Composantes Principales)

Une des techniques statistiques d'études factorielles de base en statistique descriptive multidimensionnelle – utilisée avec des variables quantitatives – les calculs aboutissent à une représentation graphique permettant de visualiser le niveau de corrélations entre les variables...

Analyse structurale

En géostatistique : étude des corrélations spatiales entre des observations voisines.

Biais

Dans l'estimation de la valeur d'un paramètre d'une répartition de probabilités, c'est la différence entre la valeur prévue et la valeur réelle du paramètre

Bootstrap (rééchantillonnage) :

L'épreuve du bootstrap est un test extrêmement sévère pour évaluer la stabilité d'une structure. Elle consiste à faire de l'inférence statistique sur de « nouveaux » échantillons tirés à partir d'un échantillon initial.

Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La CAH est une méthode de classification qui consiste à regrouper les individus ayant un comportement similaire en classes en fonction de deux critères : les individus d'une même classe sont le plus semblable possible, et les classes sont les plus disjointes possibles.

Les méthodes ascendantes sont agglomératives : à chaque étape du processus, on crée une partition en agrégeant deux à deux les individus, ou les groupes d'individus les plus proches. Pour un niveau de précision donné, deux individus peuvent être confondus dans le même groupe, alors qu'à un niveau de précision plus élevé, ils seront distingués et appartiendront à deux sous-groupes différents ; les classes formées étant emboîtantes, la classification est qualifiée de hiérarchique.

Co-krigeage

Méthode d'interpolation par krigeage d'un ensemble de variables tenant compte de la structure spatiale des corrélations entre ces variables.

Coefficient de corrélation

Indice montrant dans quelle mesure deux variables fluctuent de façon interdépendante.

Coefficient de variation

Mesure de la dispersion calculée en divisant l'écart-type d'une distribution par sa moyenne. Erreur-type d'une estimation, exprimée sous forme de ratio ou de pourcentage de l'estimation.

Corrélation linéaire

Détermine dans quelle mesure des points de données correspondent à une ligne droite. Quand tous les points se trouvent sur la ligne, on parle de corrélation parfaite. Quand les points sont dispersés dans tout le diagramme, il n'y pas de corrélation.

Corrélation négative

Dans une corrélation négative, les deux variables tendent à aller dans des directions opposées. À mesure qu'une variable augmente, l'autre diminue. On peut donc aussi parler de relation inverse.

Corrélation positive

Dans une corrélation positive, les deux variables tendent à aller dans la même direction. Lorsqu'une variable augmente, l'autre aussi augmente.

Dispersion

Décrit dans quelle mesure, les observations divergent autour de la tendance centrale.

Distance de Mahalanobis

En statistique, la distance de Mahalanobis est une mesure de distance introduite par P. C. Mahalanobis en 1936. Elle est basée sur la corrélation entre des variables par lesquelles différents modèles peuvent être identifiés et analysés. C'est une manière utile de déterminer la similarité entre une série de données connues et inconnues. Elle diffère de la distance euclidienne par le fait qu'elle prend en compte la corrélation de la série de données. Ainsi, à la différence de la distance euclidienne où toutes les composantes des vecteurs sont traitées de la même façon, la distance de Mahalanobis accorde un poids moins important aux composantes les plus bruitées (en supposant que chaque composante est une variable aléatoire de type gaussien).

Distribution de fréquences

Diagramme ou tableau montrant avec quelle fréquence chaque valeur ou chaque série de valeurs d'une variable apparaît dans un ensemble de données.

Distribution de fréquences groupées

Relation entre les valeurs d'une caractéristique et leurs fréquences, lorsque ces valeurs sont groupées en intervalles de classe.

Distribution normale

Souvent appelée simplement « courbe en cloche » ou « courbe en forme de cloche ». La plupart des résultats de ce diagramme sont groupés au centre. La moyenne, la médiane et le mode sont égaux et les résultats situés à chaque extrémité de la distribution sont moins fréquents. Par exemple, dans une courbe représentant les résultats d'un test d'intelligence, la plupart des personnes se trouvent au centre ou autour de l'intervalle d'intelligence « moyen », tandis que le nombre de personnes diminue des deux côtés à mesure que les résultats s'éloignent de la moyenne, d'où la forme et le nom de la courbe.

Données

Faits ou chiffres à partir desquelles on tire des conclusions.

Données brutes

Information qui n'a pas encore été organisée, mise en forme ou analysée.

Données catégorielles

Données qui peuvent être groupées en catégories spécifiques (aussi nommées « variables qualitatives »). Les variables catégoriques peuvent être associées à des catégories qui suivent un ordre naturel (variables ordinales) ou qui ne suivent pas d'ordre naturel (variables nominales). Par exemple, la variable « hauteur » est ordinale parce qu'elle contient les catégories « petit », « moyen » et « grand » qui suivent naturellement un ordre ascendant. Au contraire, des variables comme « sexe » et « couleur des cheveux », qui ne contiennent pas de catégories naturellement ordonnées, sont des exemples de variables nominales.

Écart-type

Racine carrée de la variance, l'écart-type mesure l'étalement ou la dispersion par rapport à la moyenne d'un ensemble de données. C'est la mesure de l'étalement la plus utilisée.

Échantillonnage aléatoire simple

Échantillonnage probabiliste de base où chaque échantillon a des probabilités égales d'être tirée.

Échantillonnage à l'aveuglette

On procède à un tel échantillonnage au hasard par commodité ou disponibilité.

Échantillonnage stratifié

Procédé d'échantillonnage où la population se répartit en sous-groupes homogènes ou en strates et où le tirage d'échantillons est indépendant dans chaque strate.

Échantillonnage systématique

Sélection d'unités dans une liste à l'aide d'un intervalle de sélection (k), de façon à ce que chaque élément de la liste touché par l'intervalle k soit inclus dans l'échantillon, l'origine ayant été choisie au hasard entre 1 et k . Si par exemple k était égal à 6 et si l'origine choisie au hasard était 2, l'échantillon serait 2, 8, 14, 20, etc.

Effectif

En statistique, l'effectif d'une population, d'un échantillon, d'une modalité d'un caractère ou d'une classe est le nombre d'individus de l'ensemble ou du sous-ensemble. Le nombre d'individus composant toute la population est appelé effectif total.

Équation de régression

Équation qui permet de prévoir une variable inconnue en utilisant la valeur donnée d'une ou de plusieurs autres variables. Par exemple, l'équation $Y = a + bX$ donne la valeur estimative de Y , si la valeur de X est connue.

Erreur aléatoire

Erreurs imprévisibles dans une estimation. Ces erreurs ont tendance à s'annuler dans un grand échantillon, contrairement aux erreurs systématiques qui vont toutes dans la même direction.

Erreur d'échantillonnage

Erreur qui se produit lorsque les données sont recueillies auprès d'une partie seulement de la population. Elle est habituellement mesurable par les données de l'échantillon en cas d'échantillonnage probabiliste.

Erreur moyenne de prédiction

Moyenne arithmétique des écarts entre une valeur prédite et une valeur observée.

Erreur quadratique moyenne (EQM)

Racine carré de la moyenne arithmétique des carrés de toutes les erreurs.

Estimation

Fait de tirer des conclusions plus vastes d'un échantillon afin de prédire certaines caractéristiques ou tendances de l'ensemble de la population.

Exactitude

Mesure dans laquelle les résultats d'un calcul ou de la lecture d'un instrument traduisent les quantités réelles qui font l'objet de ce calcul ou de cette lecture et sont exempts d'erreurs. (Voir aussi Précision)

Fluctuation d'échantillonnage

Fait qu'une statistique prend des valeurs différentes pour des échantillons différents. Elle indique donc dans quelle mesure la valeur de la statistique fluctue d'un échantillon à l'autre.

Formule

Équation ou règle mathématique.

Fourchette

Tout l'intervalle de variation numérique des résultats. La fourchette exclusive est la différence entre la valeur la plus élevée et la valeur la moins élevée d'un ensemble de données, et la fourchette inclusive, la différence entre la limite supérieure réelle de l'intervalle le plus long et la limite inférieure réelle de l'intervalle le plus court.

Fréquence

Nombre de fois qu'un événement se produit ou qu'un élément se présente dans un ensemble de données.

Fréquence cumulée

Détermine le nombre d'observations sous-jacent à une valeur particulière. On la calcule en ajoutant chaque fréquence à la somme de ses prédécesseurs dans un diagramme arborescent et un tableau de distribution de fréquences.

Fréquence en pourcentage

Fréquence de chaque valeur ou de chaque intervalle de classe, exprimée sous forme de pourcentage du nombre total d'observations. Obtenue en multipliant chacune des valeurs de la fréquence relative par 100.

Fréquence relative

Fréquence d'une valeur ou d'un intervalle de classe, exprimée en tant que proportion d'un tout et observée dans un ensemble de données pour une variable particulière. On la calcule en divisant la fréquence par le nombre d'observations.

Géostatistique

Branche des statistiques qui s'intéresse à l'étude de processus qui se déploient de façon continue dans l'espace géographique.

Krigeage

Nom donné (d'après D.G. Krige, statisticien sud-africain ayant développé des méthodes empiriques d'évaluation des stocks d'or dans les années 1950) à un ensemble de méthodes d'interpolation permettant d'estimer la valeur d'une propriété en un point de l'espace géographique à partir des observations voisines, en utilisant la théorie des variables régionalisées.

Histogramme

Diagramme formé d'une suite de colonnes avec un intervalle de classe en abscisse et une courbe de fréquences en ordonnée.

Indicatrice

Une variable binaire (0-1) (ex. $I(x)=1$ si on a le faciès A au point x et $I(x)=0$ si l'on a un autre faciès)

Information

Données qui ont été enregistrées, classées, organisées, raccordées ou interprétées dans un cadre quelconque pour que la signification s'en dégage.

Intervalle

Ensemble de chiffres se situant entre deux chiffres limites et pouvant comprendre l'un ou l'autre de ces chiffres; ainsi, l'intervalle $[1,5;3]$ comprend tous les chiffres supérieurs ou égaux à 1,5 et inférieurs à 3. Il convient de noter que le chiffre 3 se trouve exclu de cet intervalle.

Intervalle de confiance

Estimation utilisant une série de valeurs (un intervalle) pour prédire la valeur probable d'un paramètre inconnu, accompagnée d'un niveau de confiance spécifique, ou probabilité que l'estimation sera exacte (c.-à-d. que l'intervalle contiendra effectivement la valeur vraie du paramètre).

Intervalles de classe

Si une variable comporte un grand nombre de valeurs, il est plus facile, pour présenter les données, en groupant les valeurs en intervalles de classe (par exemple, groupes d'âge tels que 0-4, 5-9, 10-14, 15-19, etc. pour rendre compte de l'âge de la population), que de présenter toutes les valeurs séparément. Cela permet de distinguer plus facilement les tendances des données.

Intervalle interquartile

Différence entre les quartiles supérieur et inférieur (Q3-Q1) d'un ensemble de données. Cet intervalle sert à mesurer l'étalement des données : il s'étend sur 50 % d'un ensemble de données et élimine l'influence des valeurs aberrantes (suppression des quarts supérieur et inférieur d'un ensemble de données).

Krigeage avec dérive externe

Forme de krigeage permettant d'estimer une variable pour laquelle on dispose de peu de mesures en profitant des valeurs observées plus nombreuses d'une autre variable qui lui est linéairement corrélée.

Krigeage universel

Krigeage des résidus d'une variable après avoir modélisé les variations systématiques de cette variable par une tendance générale.

Manipulation des données

Activité par laquelle on met les données en forme définitive (diagramme, moyennes arithmétiques, données agrégées, etc.).

Marge d'erreur

Nombre relatif qui peut être exprimé sous forme de pourcentage et qui est calculé à l'aide de l'erreur d'échantillonnage d'une estimation. On l'utilise pour établir l'intervalle de confiance de cette estimation.

Médiane

Valeur de l'élément central lorsque les données sont ordonnées de la plus basse à la plus haute ; mesure de la tendance centrale. Si le nombre d'observations est pair, la médiane est la moyenne des deux observations centrales. Dans le cas des données brutes, la médiane correspond au point par rapport auquel la moitié exacte des données lui est supérieure et l'autre, inférieure.

Méthodes factorielles

Les méthodes factorielles visent à résumer de manière synthétique de vastes ensembles de valeurs numériques par le biais d'un nombre plus restreint de variables artificielles nouvelles, les facteurs. Chaque facteur représente un groupement de traits intercorrélés (linguistiques ici). Les facteurs sont généralement représentés sous forme de visualisations graphiques où les objets à décrire deviennent des points sur un axe ou dans un plan. Contrairement aux méthodes de classification qui font appel à une démarche algorithmique, les méthodes factorielles utilisent des calculs d'ajustement faisant essentiellement appel à l'algèbre linéaire.

Mode

En statistique, le mode (ou la classe modale) est la valeur (ou la classe de valeurs) de X pour laquelle l'effectif (ou la fréquence) est maximal(e). C'est la donnée la mieux représentée.

Modèle de régression

Modèle statistique utilisé pour décrire la relation entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes. Ces modèles présentent des formes et des degrés de complexité très divers. (Voir aussi Régression et Équation de régression).

Moyenne

Mesure la plus courante de la tendance centrale, la moyenne est la moyenne arithmétique d'un ensemble de nombres.

Palier

En géostatistique, représente la valeur de la semi-variance à partir de laquelle un variogramme ne croît plus.

Paramètre

Il s'agit de valeurs inconnues quantitatives (p.ex., recettes totales, recettes moyennes, rendement total, nombre de chômeurs) qui concernent toute la population ou certains domaines d'intérêt pour le chercheur.

Pépite

En géostatistique, représente la valeur de la semi-variance vers laquelle on tend quand la distance entre les observations tend vers 0. Elle représente les variations spatiales liées aux erreurs de mesure ou à des variations à des distances inférieures au pas d'échantillonnage.

Population

En statistique, les ensembles étudiés portent le nom général de population ou d'univers statistique. Cette population doit être définie avec précision.

Portée

En géostatistique, distance à partir de laquelle un variogramme ne croît plus ; elle est interprétée comme la distance à partir de laquelle des observations ne sont plus corrélées entre elles

Précision

La précision est une mesure de la similarité. Le même sondage exécuté plus d'une fois devrait donner les mêmes résultats ou des résultats similaires. Plus les résultats de chaque répétition du sondage se ressemblent, plus ils sont précis.

Qualité des données

Niveau ou degré de confiance que les données et l'information statistique sont « prêtes à l'emploi ». Les aspects auxquels Statistique Canada doit prêter attention sur le plan de la qualité ou de la capacité d'utilisation sont la pertinence, l'exactitude, l'actualité, l'accessibilité, la possibilité d'interprétation et la cohérence.

Quartiles

Pour déterminer l'intervalle interquartile, on divise l'ensemble de données en quatre parties égales. Chaque valeur marquant un palier est appelée quartile (premier, deuxième, etc.). Le deuxième quartile est aussi appelé la médiane.

Régression

Méthode statistique par laquelle on essaie de prévoir la valeur d'une caractéristique en étudiant sa relation avec une ou plusieurs autres caractéristiques. Cette relation s'exprime au moyen d'une équation de régression. (Voir aussi Modèle de régression).

Simulation géostatistique

Une simulation consiste à inventer une variable régionalisée qui ressemble à celle qu'on étudie, c'est-à-dire qui respecte ses caractéristiques structurales et les valeurs mesurées aux points de données (dans ce cas on l'appelle la simulation conditionnelle). Ces techniques reposent sur interprétation de la variable régionalisée (ici ; la teneur en alumine) comme une réalisation d'une fonction aléatoire et sur une modélisation de sa loi spatiale.

Stationnarité

Expression statistique pour désigner des degrés d'invariance des propriétés statistiques de fonctions aléatoires. Ce concept est généralement utilisé pour désigner une invariance de la moyenne générale ou de la variance sur la zone d'étude ou encore de la semi-variance pour une distance donnée.

Tendance centrale

Mesure de l'emplacement où se trouve le milieu ou le centre d'une distribution. La tendance centrale peut se rapporter à des mesures très diverses comme la moyenne, la médiane et le mode. La moyenne est la mesure de la tendance centrale la plus fréquemment utilisée.

Valeurs aberrantes

Dans un ensemble de données, ce sont les valeurs si éloignées des autres valeurs d'une distribution que leur présence ne saurait être attribuée aux seules probabilités.

Variable

Caractéristique susceptible de prendre plusieurs des valeurs d'un ensemble auquel une mesure numérique peut être appliquée (p.ex., revenu, âge, poids).

Variable continue

Variable numérique qui peut prendre un nombre infini de valeurs réelles. L'âge, la distance et la température par exemple sont considérés comme des variables continues.

Variable discrète

Variable numérique qui prend uniquement un nombre limité de valeurs réelles (par ex., X peut seulement être égal à 1, 3, 5 et 1000).

Variable nominale

Type de variable catégorique qui décrit un nom, une étiquette ou une catégorie sans ordre naturel.

Variable numérique

Variable quantitative qui décrit une valeur mesurée de façon numérique (par ex., âge ou nombre de personnes dans un ménage). Ces variables peuvent être continues ou discrètes.

Variable ordinale

Type de variable catégorique : une variable ordinale présente un ordre naturel de ses valeurs possibles, mais les distances entre les valeurs ne sont pas définies. Habituellement, les variables ordinales ont des échelles catégoriques. Par exemple, lorsqu'on demande à des personnes de choisir entre « excellent », « bon », « moyen » et « médiocre » pour évaluer quelque chose, la réponse indique seulement une catégorie, mais il existe un ordre naturel de ces catégories.

Variance

Mesure de l'étalement équivalant au carré moyen de l'écart de chaque nombre par rapport à la moyenne d'un ensemble de données. Le terme variance est aussi lié à la variation d'échantillonnage.

Variation d'échantillonnage

Variation qu'accusent des échantillons d'une même population qui sont différents, mais d'une même taille.

Variable régionalisée

En géostatistique, fonction qui prend à chaque point de l'espace une valeur qui constitue une réalisation d'un processus aléatoire.

Variogramme

Graphe représentant la semi-variance en fonction de la distance

B.2. Kaolin

Acidité

L'acidité des sols vient du matériau parental (quartz, granite, grès, etc.), de la matière organique (acides fulvique, humiques, etc.) et de l'évolution pédogénétique. Dans la couverture pédologique l'acidité vient non seulement de la présence des ions H^+ mais aussi des ions Al^{3+} . Les racines échangent des ions H^+ par des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} et acidifient le milieu. La lixiviation du calcium entraîne une acidification. L'acidité des épisolums est exprimée par des qualificatifs se basant sur les pH : hyperacide : <3.5 - très acide : 3.5 à 4.2 - acide 4.2 à 5 ; peu acide : 5 à 6.5 ; neutre : 6.5 à 7.5 ; basique : 7.5 à 8.7 et très basique : > 8.7 .

Les acides humiques sont des acides organiques polymérisés, à structure lâche ce qui les rend hydrophiles ; ils sont plus ou moins gros, plus ou moins riches en azote, et certains sont floculés par le calcium ce qui les lie aux argiles pour former le complexe argilo-humique. Les acides fulviques sont pauvres en carbone, riches en azote ; on les trouve dans les milieux acides, mal aérés.

Affleurement

Partie d'une formation recoupant la surface topographique.

Alluvion

Une alluvion se situe dans une vallée et provient du transport par l'eau, sur de longues distances, de matériaux divers, souvent arrondis, se trouvant en amont de l'endroit étudié. De ce fait, la nature des matériaux peut être très différente de celle qui se trouve sur les pentes et plateau du paysage alentour.

Altération

Modification des propriétés physico-chimiques des minéraux, et donc des roches, par les agents atmosphériques, par les eaux souterraines et les eaux thermales (Altération hydrothermale). Elle dépend en particulier du climat, de la température des eaux et de la nature des roches et de leur degré de fracturation. Elle a généralement pour effet de rendre les roches moins cohérentes ce qui facilite leur désintégration.

Altérite

Toute roche résiduelle provenant de l'altération d'une roche antérieure. Issue de la décomposition physique et/ou chimique du substrat, l'altérite a une composition minéralogique très variable qui dépend du substrat. Matériau sans structuration pédologique, l'altérite peut avoir conservé la structure apparente de la roche (isaltérite) ou non (allotérite).

Alitisation (alitization)

Altération superficielle des roches conduisant à la formation d'hydroxyde d'aluminure ($Al(OH)_3$ ou gibbsite) avec perte en SiO_2 et de divers cations. Ce processus intervient dans la formation des soles et croûtes ferralitiques, latéritiques

Argile

L'argile est une roche sédimentaire, composée pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée (phyllosilicates) qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse (sépiolite et palygorskite) qui explique leurs qualités d'absorption.

Argilite

Roche constituée principalement de minéraux argileux, sans litage net et indurée par compaction.

Argilisation

Néoformation de minéraux argileux dans la couverture pédologique dépendant de la concentration ionique, de la solubilité et du degré d'altération des constituants du sol, ainsi que du pH des conditions d'oxydoréduction, etc.

Ball clay

Argile céramique à grain très fin, principalement extraite dans le Devon et le Dorset (GB), qui constitue, en raison de sa plasticité, un élément essentiel à la fabrication de certaines céramiques, notamment pour le sanitaire et les arts de la table.

Barbotine

Pâte liquide destinée au coulage

Bauxite

Principal minéral d'aluminium, elle est composée d'oxyde ou hydroxydes d'alumine : boehmite, gibbsite, ou de fer : goéthite. Elle provient de l'altération des feldspaths et d'une évolution pédologique ancienne.

Bauxite réfractaire

Une association naturelle de minéraux riche en alumine et calcinée à très haute température. Le principal producteur est la Chine suivie de la Guyane et du Brésil.

Bentonite

La bentonite est une argile naturelle contenant une forte proportion de montmorillonite, un silicate d'aluminium hydraté natif dans lequel quelques atomes d'aluminium et de silice ont été remplacés naturellement par d'autres atomes tels que le magnésium et le fer. Des ions de calcium et de sodium sont piégés entre les couches minérales. Il existe quatre types courants de bentonite : la bentonite sodique naturelle, la bentonite calcique naturelle, la bentonite activée au sodium et la bentonite activée à l'acide

Biotite

Minéral en feuillets, dit aussi mica noir ; contient silice, alumine, magnésium, et eau (OH) ; très fréquent dans les granites, présents aussi dans les trachytes.

Formule chimique $K(Mg,Fe^{2+})_3[AlSi_3O_{10}(OH,F)_2]$

Masse molaire 433.53 gm

Composition

Oxydes	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	K ₂ O	FeO	H ₂ O
Stœchiométrique	11.76 %	41.58 %	23.24 %	10.86 %	8.29 %	3.64 %
Calciné	12.20 %	43.15 %	24.12 %	11.27 %	8.60 %	

Bioturbation

Modification de l'organisation d'un horizon, ou d'une terre par les déplacements d'organismes vivants.

Blancheur

Sensation visuelle par laquelle un corps semble s'approcher du blanc par suite d'une forte clarté, d'une diffusion élevée et d'un minimum de perception de teinte.

Blanchiment

Elimination ou modification de la couleur des composants d'une pâte en vue d'augmenter la blancheur de celle-ci.

Bone China

Nom anglais donné à la porcelaine tendre (céramique non poreuse, blanche et translucide), cuite à basse température, #1200°C, et constituée entre autres de cendre d'os (bone ash) qui joue le rôle de fondant, tenu dans la porcelaine dure par le feldspath.

Cailloux

Éléments grossiers compris entre 2 mm et 7,5 cm.

Calcaire

Roche sédimentaire essentiellement formée de calcite. Elle peut avoir des compositions assez variables en fonction du taux d'impuretés qu'elle contient (entre autre argile, fer, silice).

Carrière

Lieu où l'on extrait des matériaux de construction, de la pierre et de la roche. Exploitation à ciel ouvert.

Carotte de forage

Échantillon cylindrique de roche retiré du sol à des fins de recherche et d'exploration.

Carottier

Tige creuse prolongée par une couronne de sondage, dans laquelle la carotte s'introduit au fur et à mesure de la progression de la couronne ; des dispositifs variés empêchent la carotte de s'échapper lors de retrait du train de tige. On dit aussi tube à carottier.

Carottier à câble

Réceptacle de la carotte, intérieur au tube carottier, et qu'un câble permet de retirer pour récupérer la carotte en laissant en place dans le trou la totalité du train de tige.

Centrifuge

Appareil de classification ou d'épaississement, dans lequel la force de centrifuge joue un rôle essentiel, en appliquant la pulpe contre une surface, le bol ou panier.

Chamottes

Argiles calcinées, le plus souvent dans un four rotatif à des températures comprises entre 1400° et 1600° C qui se transforment en cristobalite et une quantité mineure de phase vitreuse. C-E Minerals est le leader mondial des argiles calcinées.

Charge

Dans l'industrie du papier, la charge consiste à introduire dans la pâte de fibres de cellulose des charges minérales non fibreuses qui viennent en remplir les espaces vides. Dans cette fonction, les pigments blancs apportent des qualités uniques au papier en termes notamment d'apparence et de faculté d'impression. Ils sont également utilisés dans de nombreuses applications industrielles comme les peintures, les plastiques, les caoutchoucs...

China clay

«Argile de Chine », de formule $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$ est blanchâtre, pâteuse et grasse ; on l'utilise en céramique et pas seulement dans la fabrication de la porcelaine. autre nom du kaolin, argile blanche malléable, issue de la décomposition du granite ou de roches similaires. Dans la plupart des cas, le kaolin subit un raffinage par procédés hydrauliques afin que ses caractéristiques physiques et chimiques correspondent aux demandes de clients pour leurs applications spécifiques. Le Groupe dispose de réserves minérales dans les trois régions d'exploitation de kaolin de haute qualité : Cornouailles (Grande-Bretagne), Géorgie (Etats-Unis), le delta de l'Amazone (Brésil).

Compaction

La compaction est la création d'un état compact par l'action naturelle du tassement et de l'enfouissement des roches au cours du temps.

Convection

La convection (d'eau) est le mouvement d'eau et des éléments en solution (solutés) causé par une force externe, telle que la gravité ou un gradient de pression hydrostatique.

Couchage

Le couchage du papier consiste à appliquer sur la surface de la pâte à papier, une fois formée et séchée, une fine pellicule composée d'un mélange de kaolin, GCC et PCC et certains additifs et liants chimiques. Cette technique permet d'obtenir un papier plus lisse, plus opaque et plus brillant.

Couche octaédrique

Couche d'octaèdres des phyllosilicates (argiles) dont le centre est le plus souvent occupée par un atome d'aluminium.

Cristallinité

Degré de pureté et régularité de l'organisation cristalline de minéraux.

Cru vert

État d'un objet façonné avant séchage.

Cyclone

Appareil de classification sans pièce mobile, de forme cylindro-conique dans lequel on injecte tangentiellement dans la partie supérieure un mélange soumis de ce fait à une force centrifuge. Quand le mélange est une pulpe, on parle d'hydrocyclone.

Dégraissage

Cuisson pour brûler les graisses et les matières organiques des décors avant émaillage.

Dépôt

1. Phénomène consistant en l'accumulation de substances sur un substratum.
2. Matière résultant de cette accumulation.

Détritique

Ce qualificatif est utilisé pour les dépôts formés de débris qui peuvent être minéraux ou coquilliers.

Diagenèse

La diagenèse est un ensemble de divers processus biochimiques et physico-chimiques qui affecte un dépôt sédimentaire et le transforment progressivement en roche compacte.

Diaspore

La diaspore est le polymorphe α de $\text{AlO}(\text{OH})$ et un composant de la bauxite.

Diffraction de rayons X

La diffractométrie de rayons X (DRX, on utilise aussi souvent l'abréviation anglo-saxonne XRD pour X-ray diffraction) est une technique d'analyse basée sur la diffraction des rayons X sur la matière. La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline, on parle aussi de radiocristallographie. Pour les matériaux non-cristallins, on parle de diffusion. L'appareil de mesure s'appelle un diffractomètre. Les données collectées forment le diagramme de diffraction ou diffractogramme.

Dilatomètre

Technique de mesure de la dilatation thermique, les pertes de linéarité des courbes allongement-température permettant notamment de caractériser les changements de phase

Dispersabilité

Capacité de constituants colloïdaux (argiles, composés humiques, bactéries) à former des suspensions (e.g. argiles, bactéries) ou des solutions (acides humiques) stables.

Eau météorique

L'eau météorique est une eau trouvant son origine dans l'atmosphère (neige, pluie). Ces eaux ont une signature isotopique qui est généralement conservée après infiltration, même après plusieurs centaines de milliers à millions d'années de résidence et de parcours dans les roches

Échantillon

Portion de minéral, de roche, de fluide, ..., prélevée pour être étudiée.

Échantillonnage

Prélèvement d'un échantillon. Un échantillonnage est dit aléatoire lorsqu'il n'obéit qu'aux lois du hasard, sans privilégier une portion particulière de la formation étudiée. Cette condition est nécessaire pour l'étude statistique de cette dernière ; il est pourtant rarement possible de la respecter en géologie, notamment du fait que les roches ne sont accessibles généralement qu'en affleurement, donc sur une petite partie de leur volume, et que la position de ces affleurements ne résulte pas du hasard

Eh

Potentiel d'oxydoréduction exprimant en volts la valeur de la différence de potentiel d'une demi-réaction d'oxydoréduction (e.g. $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$).

Engineered pigments

Kaolin et GCC dont la taille et l'agencement des particules ont été modifiés (naturellement ou par synthèse) pour leur donner des propriétés différentes à celles des produits traditionnels

Engorgement

Processus par lequel toute la porosité accessible à l'eau est saturée

Engrais

Les engrais sont des substances, le plus souvent des mélanges d'éléments minéraux, destinées à apporter aux plantes des compléments d'éléments nutritifs de façon à améliorer leur croissance et augmenter le rendement et la qualité des cultures. L'action consistant à apporter un engrais s'appelle la fertilisation. Les engrais font partis des produits fertilisants, avec les amendements.

Epaississeur

Appareil constitué par une cuve à fonde conique, où les produits épaissis sont ramenés vers l'orifice d'évacuation à la pointe du cône par des bras de raclage ou râpeaux. L'eau claire déborde en périphérie.

Épaisseur (d'une couche)

Puissance.

Épaisseur apparente

Épaisseur qui semble avoir une couche sur une coupe qui ne lui est pas perpendiculaire.

Erosion

Ensemble des phénomènes qui aboutissent à enlever les terrains situés en surface et à faible profondeur et par là modifient le relief et la surface géomorphologique. Ils combinent processus chimiques (dissolution, altérations par les eaux) et processus mécaniques d'origine variée (gravité, eaux, vent, glace, etc.) qui désagrègent les roches et enlèvent les débris. Ils dépendent du climat, de la nature des roches et des formes du relief.

Erosion fluviale

L'érosion a lieu surtout sur les côtés concaves des méandres où la vitesse de l'eau est plus grande. Elle peut avoir lieu lors des grandes crues, bien qu'en même temps la rivière alluvionne.

Erosion éolienne

Causée par le vent, elle se produit près des côtes marines, ou lacustres, des zones arides, etc. Elle est active surtout quand la végétation est absente et quand les états de surface de la couverture pédologique sont secs et peu structurés.

Exploitation

Activité minière ayant pour but l'extraction, la concentration, la fonte ou l'affinage de substances minérales à partir d'un gisement minier.

Exploration

Au sens large, tout l'éventail d'activité minière qui va de la recherche des gisements et leur mise en valeur, jusqu'à l'aménagement du complexe minier. Au sens strict, l'activité de recherche des gisements, jusqu'à la découverte et la première délimitation par forages et échantillonnages d'un gisement.

Extracteur de carotte

Dispositif permettant de sectionner la carotte et de la maintenir lors de sa sortie de trou.

Extraction

Portion de l'exploitation consistant à retirer le minerai, le stérile ou les résidus miniers d'un chantier souterrain ou de la mine à ciel ouvert.

Faciès

Ensemble des caractères d'une roche qui permet de la rattacher à un domaine de sédimentation

Faïence

Céramique blanche, non translucide, peu résistante, cuite à environ 1 150°. Sa composition est essentiellement à base d'argiles auxquelles s'additionnent du feldspath et du quartz. C'est un produit poreux qui nécessite d'être émaillé.

Faïlle

Cassure avec déplacement relatif (appelé rejet) des deux parties ainsi créées. La longueur d'une faille peut varier de quelques mètres à plusieurs centaines de kilomètres. Son rejet est également variable (du décimètre à plusieurs kilomètres). Les fractures d'extension et de rejet moindres sont appelées "micro-failles".

Feldspaths

Minéral naturel utilisé pour la vitrification des pâtes céramiques (fabrication de la porcelaine et de la faïence).

Filtre-presse

Machine constituée de moules filtrants (des bâtis) garnis de toiles fines dans lesquels la pâte est injectée à haute pression sous forme de barbotine. Sous l'effet de la pression l'eau s'élimine au travers des toiles et la pâte se raffermie en se densifiant. La densité recherchée correspond à un degré de dureté en rapport avec l'eau restant dans la pâte. Après débâtissage du filtre-presse on obtient la pâte sous forme de galettes

Filtre à vide

Filtre dans lequel un vide partiel force le passage du filtrat à travers élément filtrant. L'action du vide s'exerce sur une partie du filtre, appelée secteur ou zone d'aspiration. Le gâteau qui en résulte est en suite dans la plus part des cas soumis à l'action de l'air surpressé qui aide à le décoller de l'élément filtrant.

Flint clay

Désigne une argile réfractaire dure, non plastique, et ressemblant au silex. Les argiles réfractaires qui se forment sous les couches de charbon sont connues sous le nom de « under-clay ».

Floculation

Agglomération ou coagulation de particules individuelles en suspension dans l'eau et qui forment des agrégats visibles.

Flottation

Procédé de séparation par lequel des particules en suspension dans l'eau ("flottant dans l'eau") sur base de leur pouvoir d'adhérence à l'eau. En insufflant de l'air, les particules manifestant une bonne adhérence subsistent.

Forage

Puits de petit diamètre creusé mécaniquement et destiné à l'exploitation d'une nappe d'eau souterraine, d'un gisement de pétrole... Lorsque le puits est destiné à la reconnaissance du sous-sol, p. ex. pour déterminer la constitution d'un gisement minier, on parle plutôt de sondage, bien que les deux mots soient souvent employés indistinctement.

Formations superficielles

Matériaux meubles ayant pu être consolidés ultérieurement, et dont la genèse est liée à l'évolution du relief observable actuellement. Elles ne sont pas recouvertes de sédiments. Hormis les surfaces d'érosions qui peuvent être très anciennes, la plupart des formations superficielles datent du quaternaire.

Frittage

Traitement sous haute pression de substances pulvérulentes par lequel on obtient une structure résistante. On utilise ce procédé dans des métaux, dans de la céramique et dans des matières synthétiques.

Fritte

Produit vitrifié issu d'une fusion à haute température de matières premières pour composition d'émaux

Gâteau de filtre

Dépôt formé par les solides à la surface d'un élément filtrant et contenant toujours encore une fraction du fluide filtré.

Géomorphologie

Etude de l'origine et de l'évolution au cours du temps de la surface topographique (formes du relief et affleurements des couches géologiques), du fait des processus d'érosion-dépôt (mécanique et chimique) et des actions climatiques. Par extension, résultats en terme de modification du paysage.

Gibbsite

Hydroxyde d'alumine, $\text{Al}(\text{OH})_3$ (65.36% Al_2O_3 + 35.64% H_2O) très répandue dans les bauxites, et les cuirasses ferrallitiques.

Goethite

Hydroxyde de fer, $\text{FeO}(\text{OH})$, très répandu dans les gisements de fer, les alios, certaines cuirasses ferrallitiques. Elle donne la couleur ocre des sols tempérés, et fersiallitiques. Elle résulte d'une cristallisation lente en présence de matière organique complexante, et est compatible avec des milieux acides.

GPR (Relevé radar)

GPR est un radar à pénétration de sol. Le mot GPR est l'acronyme anglais pour Ground Penetrating Radar. Le principe de fonctionnement des GPR est celui des radars. Des ondes électromagnétiques sont envoyées dans le sous-sol. Lorsque ces ondes rencontrent des changements de milieux, une partie est renvoyée vers la surface et enregistrée par le GPR. Plus la fréquence est élevée, plus la précision est grande, mais plus le signal est atténué selon la profondeur atteinte. La gamme de fréquence va de quelques MHz à quelques GHz.

Granite

Roche plutonique dont la cristallisation s'est faite en profondeur et lentement. Elle comporte du quartz, des feldspaths (potassiques comme l'orthose), et de la biotite (mica noir ferro-potasso-magnésien). Les terres issues du granite peuvent avoir des textures diverses, selon l'altération du mica et du feldspath, mais sont la plupart du temps plus ou moins acides.

Granulométrie

Distribution de la taille des grains, cette distribution peut être présente par une courbe de (la répartition) granulométrique.

Gres

Roche sédimentaire détritique, les grès sont constitués de grains de quartz cimentés par une pâte plus ou moins solide qui détermine en grande partie l'altération des grès situés sous la couverture pédologique. Ce ciment peut être de l'argile, du calcaire, du fer, de la glauconie, ou de la silice (quartzite).

Grès

Céramique utilisée pour les carrelages, la vaisselle et le sanitaire. Ce produit se situe entre la porcelaine et la faïence. Résistant, il permet de cuire des grandes pièces (particulièrement utile pour les équipements sanitaires). Sa composition, semblable à celle de la faïence, fait appel à des argiles spécifiques. Le grès est également un produit poreux.

Halloysite

Minéral argileux qui diffère de la kaolinite par la présence d'une couche d'eau dans l'espace interfoliaire. La distance interfoliaire est alors de 1 nm (10 Å).

Hématite

Oxyde de fer, Fe_2O_3 , qui donne la couleur rouge aux sols fersiallitiques, ferrallitiques, ainsi qu'aux matériaux hérités du triasique par exemple. Elle résulte d'une cristallisation rapide en absence de matière organique et est favorisée par un milieu neutre, et des saisons contrastées.

Hydrolyse

Mécanisme d'altération des aluminosilicates individualisant l'aluminium sous forme de composé insoluble, la silice restant en solution à l'état d'acide non dissocié. On distingue une hydrolyse totale dite allitisation, d'une hydrolyse partielle dite siallisation qui se différencie en 1/monosiallisation lorsque le processus conduit à une argile 1/1 dont la charge est nulle électriquement (cristallisation de Kaolinite, régions tropicales) ou 2/bisiallisation lorsque le processus conduit à une argile 2/1 de type smectique et qui présente une certaine charge, compensée par la rétention de divers cations basiques en position interfoliaire (régions tempérées).

Hydromorphie

Phénomène dû à un excès d'eau dans la couverture pédologique ou un horizon. L'excès d'eau peut être dû aux précipitations atmosphériques, mais aussi à des apports d'eau superficiels (inondations, ruissellement, etc.) ou profonds (remontées de nappe, etc.).

Illite

L'illite est un minéral argileux (ou phyllosilicate) hydraté de formule chimique générale $K_xAl_{12}[(Si, Al)_4O_{10}](OH)_2$.

Formule chimique $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$

Masse molaire 389.34 gm

Composition

Oxydes	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	K ₂ O	FeO	H ₂ O
Stœchiométrique	17.02 %	54.01 %	3.11 %	7.26 %	1.85 %	12.03 %
Calciné	19.35 %	61.40 %	3.54 %	8.25 %	2.10 %	

Interfoliaire

Espace situé entre deux feuillets d'argile, pouvant être occupé par des cations, de l'eau ou d'autres molécules.

Interstratifié

Les interstratifiés (ou minéraux argileux interstratifiés) sont des minéraux formés par l'alternance plus ou moins régulière de feuillets argileux de différente nature, par exemple illite/smectite dans le cas du Callovo-Oxfordien.

Kaolin

En industrie de céramique : Argile fine à porcelaine provenant de la décomposition complète de feldspaths et de granits. À cause de sa faible teneur en fer, cette argile devient d'un blanc très pur à la cuisson. Ce terme est dérivé du mot chinois Kao-ling (montagne).

En industrie de papeterie : Variété d'argile blanche très pure employée comme charge dans le papier ainsi que comme élément dans les mélanges servant au couchage du papier.

En industrie des réfractaires : Argile constituée principalement de kaolinite, peu plastique, cuisant blanc.

Le terme kaolin est utilisé pour définir une roche argileuse composée principalement des minéraux de la famille de kaolinite. Les impuretés sont le quartz, le reste de feldspaths, micas, des autres minéraux argileux, les oxy-hydroxydes de fer et les oxydes de titan.

Kaolin calciné

Kaolin dont les propriétés physiques sont modifiées par de très hautes températures (700 à 1 200°C). La calcination accroît la blancheur des particules, les rend moins hydrophiles et réduit leur conductivité électrique.

Kaolinisation

Forme de siallisation qui consiste en l'altération des aluminosilicates avec production de kaolinite.

Kaolinite

Minéral argileux type du groupe de la kaolinite. L'un des constituants principaux des argiles, résultant de l'altération superficielle de nombreux silicates d'alumine (feldspaths...).

Formule chimique $Al_2Si_2O_5(OH)_4$

Masse molaire 258.16 gm

Composition

Oxydes	Al ₂ O ₃	SiO ₂	H ₂ O
Stœchiométrique	39.50 %	46.55 %	13.95 %
Calciné	45.90%	54.1%	

Latérites

Regroupent des sols rouges lessivés, pauvres en silice mais riches en oxydes de fer et d'aluminium

Lessivage

Transport vertical ou latéral de particules d'argile dans le solum vers des horizons sous-jacents ou situés en aval. Cette argile est transportée mécaniquement par l'eau. Cette argile illuviale se dépose sur les faces des agrégats ou dans les fentes en formant des revêtements (ou cutanes).

Limon

1/Fraction granulométrique comportant les particules dont la taille est comprise entre 2 et 20 mm pour les limons fins, et entre 20 et 50 mm pour les limons grossiers.

Lithologie

Nature des roches d'une formation géologique. - Désuet dans le sens de science des roches (Syn. Pétrographie, pétrologie).

Lixiviation

Mouvement de substances dissoutes causé le transfert de l'eau ou d'autres liquides dans le sol.

Mine

Complexe aménagé pour l'extraction d'une substance minérale, d'un minerai, soit sous terre, soit en surface. Lorsque le minerai est extrait sous terre, la mine requiert un système d'excavation pour avoir accès au minerai. Lorsque le minerai est à la surface, il est extrait d'une ou de plusieurs mines à ciel ouvert.

Minerai

Un agrégat naturel d'un ou de plusieurs minéraux qui peut être extrait et vendu avec profit dans les conditions actuelles, ou dont peuvent être extraits un ou plusieurs minéraux de façon rentable.

Minéral

Substance naturelle inorganique caractérisée par sa structure atomique, ses propriétés physiques et chimiques.

Minéraux allophaniques

Aluminosilicates hydratés comprenant l'imogolite et les allophanes. Ces minéraux sont présents dans les sols à caractères andiques se développant sur matériaux volcaniques et dans les sols très acides à processus de podzolisation.

Minéraux primaires

Minéraux constitutifs de la roche ou des roches mères des sols.

Minéraux secondaires

Minéraux issus de la transformation des minéraux primaires. Ce sont essentiellement les argiles, les oxydes et les oxyhydroxydes.

Modèles numériques de climat

Un modèle numérique du climat est une représentation mathématique simplifiée du système climatique de la Terre, c'est-à-dire de l'ensemble formé par l'atmosphère, les océans, les terres émergées, la cryosphère et la biosphère. On appelle modèle mondial couplé un modèle qui représente tous ces éléments (ou quelques un) et la façon dont chacun d'eux agit et rétroagit sur ses voisins, par échange de chaleur, d'humidité, de quantité de mouvement. Historiquement, les modèles de climat ont commencé à être développés dans les années 1970 et chaque partie du système a d'abord été représentée individuellement, à commencer par l'atmosphère. Au fur et à mesure les parties ont été couplées : les modèles ont intégré de façon de plus en plus exhaustive les actions et rétroactions entre elles, c'est-à-dire les échanges de chaleur, d'humidité et de la quantité de mouvement. Finalement, à la représentation des lois physiques régissant le climat, s'est ajoutée la prise en compte de la chimie de celui-ci.

Monitor (canon à eau)

Lance à eau sous pression, articulée sur un support, utilisée pour l'abattage ou le délitage de matériaux.

Mullite

Le composant essentiel des réfractaires acides. Il s'agit d'un composé silico-alumineux (Al_2O_3 72%) qui n'existe que très rarement à l'état naturel et que l'on obtient en chauffant des matières premières à base d'Alumine-Silice telles que des argiles, de l'andalousite, de la kyanite, etc.

Mur

Éponte située au dessous des matériaux utiles. Au sens géologique, et dans le cas d'une couche, le mur désigne l'éponte de formation plus que les matériaux utiles. Le mur géologique coïncide avec le mur du mineur, à moins que des mouvements de terrains n'aient pas renversé la série stratigraphique.

Muscovite

Mica blanc, silicate d'alumine potassique fréquent dans les granites, gneiss.

Formule chimique $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$

Masse molaire 398.71 gm

Composition

Oxydes	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	H ₂ O
Stœchiométrique	38.36 %	45.21 %	11.81 %	4.07 %
Calciné	39.99%	47.13%	12.31	

Orogenèse

Formation d'une chaîne de montagnes.

Paléo-fluides

Les paléo-fluides (préfixe paléo ou palaeo tiré du grec palaios pour ancien) sont des fluides qui ont pu intervenir dans le passé lors la diagenèse des roches sédimentaires. Il peut s'agir par exemple d'eaux marines lors de la sédimentation ou d'eaux météoriques en contexte continental.

Paléosol

Sol formé anciennement dont il reste tout ou partie des horizons ce qui permet d'en définir la pédogenèse. Dans les sols polycycliques, on identifie plusieurs pédogenèses superposées de nature différente.

Pédogenèse

Les facteurs de différenciation de la couverture pédologique sont : 1) les formations superficielles et le matériau dans lesquels la pédogenèse se développe, 2) le relief et la géomorphologie, 3) la végétation, la faune et les diverses actions de l'homme sur elle, 4) l'énergie apportée au système principalement par : le soleil (chaleur), la terre (la gravité) et l'atmosphère (les apports d'eau et de particules), 5) la durée d'évolution. En fonction du temps, et de ces facteurs se différencient les horizons qui vont intervenir dans l'évolution de la couverture pédologique, dans les flux d'eau et de particules en constituant, en particulier des écrans ou des transferts privilégiés.

Pédologie

Science qui étudie les sols et les horizons dans leurs relations réciproques (c'est à dire la couverture pédologique), ainsi que leurs caractères physiques, chimiques, hydriques, biologiques en lien avec leur position dans le paysage.

Percolation

Écoulement dans les fissures, les galeries d'animaux, les pores les plus grands, de l'eau dans la couverture pédologique, sous l'effet de la gravité. Il s'agit d'une eau qui passe rapidement, soit parce que la couverture pédologique est très perméable (texture et surtout structure favorables), soit parce qu'étant saturée, les forces de liaison n'interviennent pas.

Phylosilicates

Silicate dont les tétraèdres sont disposés en feuillets

Pigments blancs

On utilise le kaolin, le GCC et le PCC dans l'industrie du papier comme charge afin d'améliorer la texture et la blancheur des feuilles, d'assurer une absorption plus rapide et régulière des encres. Ces produits sont aussi utilisés pour coucher le papier c'est-à-dire accroître son lissage et sa brillance pour des impressions de haute qualité. Le kaolin et le GCC servent également à améliorer la performance de plusieurs types de peinture en termes d'opacité et de résistance à l'abrasion. Enfin, ils peuvent permettre de réduire le coût des produits finis.

Plastique

Dans un sens général, on dit qu'un matériau est plastique lorsqu'il peut se déformer sous l'action d'une force sans perdre sa cohésion, tout en conservant sa nouvelle forme lorsque la force a cessé d'agir.

Perméabilité

Paramètre caractérisant le débit d'un fluide (eau ou gaz) s'écoulant à travers un milieu poreux soumis à un gradient de charge hydraulique (eau) ou de pression (gaz).

Podzolisation

Processus de pédogénèse se manifestant par des altérations fortes en milieu acide. Ils se traduisent par une destruction des minéraux et en particulier des argiles, une migration de complexes organo-métalliques et une insolubilisation de matières organiques et de fer et d'aluminium dans des horizons d'accumulation BPh et BPs.

Podzols

Ils sont caractérisés par le processus de podzolisation qui comprend : 1/ une acido-complexolyse, processus biogéochimique d'altération, qui est une attaque des minéraux par des solution organiques complexantes. L'aluminium et le fer et les cations sont éliminés, et il ne reste que le quartz, on a formation d'un horizon E ; 2/ un processus de migration puis d'immobilisation des constituants organiques, et des complexes organo-minéraux (de fer ou d'aluminium), cela conduisant à une accumulation qui se fait dans les horizons BP podzoliques. Les horizons BP peuvent être cimentés (alios) ou meubles, et avoir de

fortes teneurs en fer et aluminium (BPs) ou en carbone organique (BPh). Si ces deux horizons existent dans le même solum, BPh est au dessus de BPs.

Les podzols sont très acides, présentent une texture souvent grossière avec des enracinements souvent limités soit par la pauvreté chimique de l'horizon E, soit par l'induration des horizons BP ou Femp. La réserve en eau est souvent assez faible, mais dans les Landes de Gascogne, une nappe d'eau à faible profondeur entraîne un excès d'eau. Par contre les PODZOSOLS se réchauffent facilement et sont faciles à travailler. Il faut donc souvent : drainer, irriguer et faire des apports fertilisants pour cultiver sur ces sols.

Porcelaine

Céramique très blanche, résistante et translucide, cuite autour de 1400°, utilisée pour la vaisselle. Elle est composée essentiellement de kaolin auquel s'ajoutent du feldspath et du quartz.

Poterie

Regroupe les objets utilitaires ou décoratifs fabriqués en terre cuite par tous les peuples primitifs. Le premier stade est la poterie mate sans glaçure

Prospection

Au sens large, la prospection peut signifier exploration minière. Au sens strict, la prospection décrit la recherche d'indices minéralisés en surface (par les prospecteurs).

Puissance

Épaisseur d'une couche ou d'une série de couches mesurée perpendiculairement à la stratification. C'est donc l'épaisseur réelle par opposition à l'épaisseur apparente qui peut être relevée p. ex. dans un sondage oblique à la stratification.

Rayon gamma

Les rayons gamma, symbolisés par la lettre grecque γ , sont une forme de rayonnement électromagnétique de haute énergie produits par la désintégration γ ou d'autre processus nucléaire ou subatomique tel que l'annihilation d'une paire électron-positron. Ils possèdent une longueur d'onde très courte inférieure à 5 picomètres. La découverte des rayons gamma est due à Paul Villard, chimiste français (1860-1934).

Réfractaires

Matières résistant aux très hautes températures. Leurs propriétés sont aussi, suivant les applications, de supporter des poids importants et de résister à la corrosion.

Réfractaires monolithiques

Ils sont constitués de matières premières minérales, naturelles ou synthétiques, telles que chamottes, andalousite, mullite, bauxite, alumine tabulaire ou fondue, spinelle (monolithiques « acides »), auxquelles sont incorporés des liants : ciment, réfractaires, argiles, additifs. Les monolithiques sont posés en utilisant les techniques de coulage, de bouchage et de projection.

Rhéologie

La rhéologie est une partie de la mécanique qui étudie la plasticité, l'élasticité, la viscosité et la fluidité caractéristiques des corps déformables. Du grec reo (couler) et logos (étude). L'on pourrait définir aussi la rhéologie comme l'étude des écoulements liquidiens ainsi que des déformations qui les accompagnent.

Réserves minérales

la partie des ressources minérales mesurée ou indiquées qui peut licitement être extraite de manière rentable dans des conditions économiques spécifiées et généralement reconnues comme raisonnables dans l'industrie minière et dont l'existence est établie par une étude préliminaire de faisabilité ou une étude de faisabilité. Les réserves minérales sont classées, en fonction du degré de confiance à l'égard de l'estimation de la quantité et de la teneur ou qualité du gisement (ressources minérales probables ou prouvées).

Réserves possibles

Blocs de minerai dont la continuité n'est pas assurée par des forages et des échantillonnages sur une maille régulière. Les réserves possibles sont d'excellentes cibles pour augmenter les réserves probables et pour étendre le gisement sur une plus grande superficie, en général en profondeur.

Réserves probables

Blocs de minerai dont la continuité est assurée et démontrée par des forages et des échantillonnages sur une maille relativement large mais régulière. La densité de la maille doit permettre d'établir la masse ainsi que le volume, les limites, la densité et les teneurs des minéraux et métaux d'intérêt avec une précision suffisante pour une planification minière préliminaire. Une nouvelle exploitation minière ne peut être entreprise seulement avec des réserves probables

Réserves prouvées

Blocs de minerai dont la masse ainsi que le volume, les limites, la densité et les teneurs des minéraux ou des métaux d'intérêt sont connus de façon détaillée. Ceci suppose que des travaux miniers ayant permis des échantillonnages massifs ainsi que des forages et autres échantillonnages sur des mailles régulières et rapprochées, localisées près des travaux miniers, ont été exécutés. Les connaissances de la distribution interne des minéraux et des métaux d'intérêt doivent permettre une planification minière détaillée.

Ressources minérales

Un gisement d'une substance naturelle solide (organique fossilisée ou inorganique), dont la quantité et la teneur ou qualité sont telles qu'il est ou peut être possible de l'extraire de manière rentable.

Retrait

Rétrécissement de la pâte lors des opérations de séchage et cuisson. On distingue le retrait de séchage du au départ de l'eau de façonnage, le retrait de cuisson du au tassement de la pâte sous l'effet des transformations physico-chimiques de la cuisson (déshydratation, décarbonatation, vitrification, etc...) et le fluage, retrait du aux forces gravitationnelles sur la pâte à chaud

Sédimentologie

Etude de l'ensemble des processus conduisant à la mise en place des sédiments. La sédimentation est aussi influencée par l'évolution climatique (température, ensoleillement, phénomènes liés aux glaciations, précipitations...) laquelle conditionne la productivité biologique dans le milieu.

Sédiments fluviaux

Les sédiments fluviaux sont composés de sables et d'argiles. Au débouché dans la mer, les sables sont déposés les premiers, les argiles, selon leur taille, sont transportés plus loin au large

Smectites

La smectite est un minéral argileux ayant un réseau cristallin expansible en fonction de sa teneur en eau et de formule chimique générale $(\text{Na}, \text{Ca}_{0.5})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2 [\text{Si}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_2, n\text{H}_2\text{O}$.

Sondage carotté

Sondage foré à l'aide d'un outil permettant la récupération continue d'un cylindre de roche (carotte) dans modification de la structure des matériaux.

Sondeuse

Machine permettant d'effectuer des trous cylindriques dans les roches en vue de leur reconnaissance.

Spectrométrie de fluorescence X

La spectrométrie de fluorescence X (SFX ou FX, ou en anglais XRF pour X-ray fluorescence) est une méthode d'analyse chimique élémentaire utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X. Lorsque l'on bombarde de la matière avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X ; c'est la fluorescence X, ou émission secondaire de rayons X. Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon, en analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.

L'analyse du spectre peut se faire de deux manières :

Par analyse dispersive en longueur d'onde (WD-XRF, wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry) ;

Par analyse dispersive en énergie (ED-XRF, energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry).

Stratigraphie

Partie de la géologie qui étudie la succession des couches de dépôts sédimentaires ou strates en vue d'établir l'ordre normal de superposition et l'âge relatif.

Structure cristallographique

Il s'agit de la façon dont les atomes constituant un composé chimique, s'organisent dans un volume lorsque ce dernier est à l'état solide. Un matériau qui n'a pas de structure cristallographique définie est un matériau amorphe, par exemple, le verre.

Substitution d'atomes

Lors de la cristallisation, des atomes ayant des rayons atomiques voisins peuvent occuper les mêmes positions au sein de la maille cristalline. Ainsi, dans les argiles, l'aluminium peut occuper le centre d'un tétraèdre d'oxygène, en lieu et place du silicium

Suspension colloïdale

Fluide dans lequel des particules très petites (ici les argiles) restent dispersées, c'est-à-dire qu'elles ne sédimentent pas ni ne s'agregent avec le temps.

Tarière

Vrille servant à l'exécution de trous de reconnaissance et au prélèvement d'échantillon en terrain meuble.

Taux de découverte

Dans une exploitation à ciel ouvert, rapport entre la quantité de stérile extraite pour exploitation d'une quantité de matériau utile donnée de cette dernière quantité ; en ne tenant compte, généralement que du stérile extérieur au minerai.

Taux de recouvrement

Dans un gisement stratiforme exploité à ciel ouvert, rapport des épaisseurs de stérile sus-jacent et de matériau utile. Peut être étendu à des gisements non stratiforme

Teneur

La teneur d'un élément cherché s'exprime toujours en masse par rapport à une masse, généralement en gramme(g) par tonne(t)(1 t =1000Kg), sauf pour les substances économiques des placers où la teneur s'exprime en masse par rapport à un volume. (Prospection minière)

Terre cuite

Premier stade de la céramique. Mélange d'argile et de sable malaxé qui peut être façonné à la main, au tour, ou moulé, décoration en relief ou en creux avec ou sans coloration. Cuisson basse température selon les moyens (feu de bois...).

Toit

Eponge située au dessus des matériaux utiles.

Tonnage

Quantité de matière impliquée dans une déformation tectonique. « Le tonnage des plis de fond et un multiple élevé de celui des chaînes géosynclinales ».

Tourbe

Ce terme présente des sens divers en géologie et écologie. En conséquence, en Pédologie on a retenu le terme de HISTOSOLS pour caractériser les sols se trouvant dans une tourbière. La tourbe, en tant que matériau peut servir pour améliorer les qualités physiques de certaines terres en en augmentant la réserve en eau. Elle sert aussi dans la composition de certains amendements. Elle est encore utilisée comme combustible, de qualité médiocre.

Transgression marine

Traduit l'avancée de la mer sur un continent

Vermiculite

Mica hydraté qui s'expande fortement sous l'effet de la chaleur, ce minéral est notamment utilisé pour l'isolation thermique et l'horticulture.

REFERENCES

A-D

1. Agnello V.N., (2005), « The kaolin industry in the republic of south africa », Mineral Economics, Mineralia Centre, Departement of Mineral and Energy, république d'Afrique de sud, REPORT R47/2005
2. Allard T., Malengreau N., Muller J.P., (1992), «Approche spectroscopique de la typologie des kaolins des Charentes», dans : Valorisation des Ressources Minérales, Document Ministère de la Recherche et de la Technologie, 461-478.
3. Allen P., (1997), « Earth surface processes », Blackwell, 404p.
4. Aliprandi G., (1979), « Matériaux réfractaires et céramiques techniques (I. Eléments de céramique et de la technologie) », SEPTIMA, Paris, 612p.
5. Aparicio P., Galan E., (1999), « Mineralogical interference on kaolinite crystalline index measurements », Clays and Clay Minerals, Vol. 47, No. I, pp. 12-27.
6. Aparicio P., Perez-Bernal J.L., Galan E., Bello M.A., (2004), « Kaolin fractal dimension. Comparison with other properties », Clay Minerals, Vol 39, pp 75–84.
7. Armstrong M., (1983), « Comparing drilling patterns for coal reserve assesment », Proc Aust. Inst. Min. Metall., N° 288, pp.1-15.
8. Armstrong M., (1998), « Basic Linear Geostatistics), Springer, 153p.
9. Armstrong M. Carignan J., (1997), « Géostatistique linéaire, Application au domaine minier », Les presses de l'Ecole des Miens, Paris.
10. Bal M., Fiederling-Kaptienant H.G., (2007), « La marché méditerranéen des argiles de 1990 à 2005 », ICV, n° 1012, mai/juin, pp. 22-24.
11. Banos J.O., Amouric M., De Fouquet C., Baronnet A.,(1983), « Interlayering and interlayer slip in biotite as seen by HRTEM », American Mineralogist, Vol. 68, pp754-758.
12. Barbosa E., (2002), « Evolution du kaolin supergène de la rivière Capim (nord-est du Para-Bresil) relation entre les caractéristiques minéralogiques, cristalochimiques et les propriétés industrielles », Thèse de doctorat, LEM, Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy.
13. Bates B.F., (1964), « Geology and Mineralogy of the Sedimentary kaolins of the Southeastern United States. A review: Clay and Clay Minerals », dans: W.F. Bailey (Ed.), «Procedures of the Twelfth National Conference», 1963. Macmillan, New York, pp. 177-194.
14. Beauvaisa A., Ritza M, Parisota, J-C., Bantsimbac C., Dukhand M., (2004), «Combined ERT and GPR methods for investigating two-stepped lateritic weathering systems», dans: «Geoderma 2004», Vol.119, pp. 121–132.
15. Berezhnoy I.N., (1961), « Further improvement of mining operations at clay and kaolin mines », Journal Refractories and Industrial Ceramics, Vol. 2, N°. 1-2, pp. 6-13.

16. Berton Y. Le Berre P., (1983), « Guide de prospection des matériaux de carrière », Manuels et méthodes N°5 BRGM, Orleans, 160 p.
17. BGS (British Geological Survey), Natural Environment Research Council, «Mineral Planning Factsheets, Fireclay Oct.2005», <http://www.mineralsuk.com/britmin/mpffireclay.pdf>
18. Bich C., (2005), « Contribution à l'étude de l'activation thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
19. Bideaux R., (1990), « Ore Reserve Estimation », dans : Kennedy B.A., « Surface Mining », 2ème édition, SME.
20. Breen C., Ille's J., Yarwood J., Skuse D.R., (2007), « Variable temperature diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopic investigation of the effect of ball milling on the water sorbed to kaolin », Vibrational Spectroscopy, Vol 43, pp 366–379.
21. Bruke A. (2006), « Half full or half empty ? Filling North America's kaolin demand », Industrial Minerals March 2006, pp 28-34
22. Bryant C. Bechtold I. Culter B., (1980) « Reaction of Clay and Carbon to Form and Separate Al₂O₃ and SiC », Journal of the American Ceramic Society 63 (5-6), 271–275.
23. Buie, B.F., Hetrick J.H., Patterson, S.H., Neeley, C. L., (1979), « Geology and industrial mineral resources of the Macon-Gordon kaolin district, Georgia: U.S », Geological Survey Open File Report 79-526, 41 p.
24. Bundy W.M., (1993), « The diverse industrial applications of kaolin », dans : H.H. Murray, Bundy W., Harvely C., «Kaolin genesis and utilisation», Clay Minerals Society, pp. 43-74.
25. Cailleres S., Henin S., Rautureau M., (1989), « Les argiles », SEPTIMA, Paris, 126p.
26. Callière S., Jourdain M.A., (1956), «Sur quelques particularités de la formation argileuse de Montguyon (Charente Maritime) », Bull. Gr. Ft. Argiles 7, 31-38.
27. Cameselle C., Nunez M.J., Lema J.M., (1999), « Leaching of kaolin iron-oxides with organic acids », Journal of Chemical Technology & Biotechnology, Vol. 70, N°. 4, pp. 349-354.
28. Canning R., (2006), « Cosmetic kaolin : not just a pretty face », Industrial Minerals Sep 2006, pp 79-82.
29. Carniero B.S., Angelica R.S., Neves R.F., (2004), « Mineralogical and geochemical characterization and ceramic properties evaluation of the hard kaolin from the Capim region, Northern Brazil », dans : «8th International Congress on Applied Mineralogy, 2004, Águas de Lindóia, Applied Mineralogy», Vol. 2. p. 665-668.
30. Casanova J., (1975), « Procédé d'obtention d'un kaolin calciné de blancheur élevée », Brevet d'invention N° 73 43152, Institut National De La Propriété Industrielle.
31. Cases J.M., Cunin P., Grillet Y., Poinson C., Yvon J., (1986), « Methodes of analysing morphology of kaolinites : relations between crystallographic and morphological properties », Clay Minerals, Vol.21, pp. 55-68.

32. Cases J.M., Lietard U., Yvon J., Delon J.F., (1982), «Etude des propriétés cristallographiques morphologiques et superficielles de kaolinites désordonnées», Bull. Miner., Vol. 105, 439-455.
33. Castelein O., (2000), « Influence de la vitesse du traitement thermique sur le comportement d'un kaolin : application au frittage rapide », Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges.
34. Chandrasekhar S., Ramaswamy S., (2006), « Iron minerals and their influence on the optical properties of two Indian kaolins », Applied Clay Science, Vol. 33, N°. 3-4, August 2006, pp. 269-277.
35. Chang Z.H., Guo F., Chen J.F., Yu J.H., Wang G.Q., (2007), « Synergetic flame retardant effects of nano-kaolin and nano-HAO on LDPE/EPDM », Polymer degradation and stability, N°. 92, pp. 1204-1212.
36. Châteauneuf J., Dubreuilh J., Platel J.P., (1977) « Eléments de datation par palynologie du Tertiaire continental h faciès sidérolithique des Charentes ». Bull BRGM (2), I, 356-359.
37. Chauvet P., (1999), « Aide-mémoire de géostatistique linéaire », Paris, Les Presses de l'Ecole des Mines. 370 p.
38. Chen P.Y., Lin M.L., Zhi Z., (1997), « On the origin of the name kaolin and the kaolin deposits of the Kauling and Dazhou areas, Kiangsi, China », Applied Clay Science, Volume 12, Issues 1-2, June 1997, Pages 1-25.
39. Chilès J.P., (2004), «La modélisation géostatistique de la variabilité spatiale et ses applications », Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Sciences de la terre, Paris, Université Pierre et Marie Curie.
40. Chilès J.P., Delfiner P., (1999), «Geostatistics : Modeling Spatial Uncertainty», Wiley Series in Probability and Statistics, Wiley.
41. Choo C.O., Kim S.J., (2004) , « Dickite and other kaolin polymorphs from an Al-rich kaolin deposit formed in volcanic tuff, southeastern Korea », Clays and Clay Minerals, December 2004, Vol. 52, N°. 6, pp. 749-759.
42. Clark I., (1979), « Practical Geostatistics », Elsevier, 137p.
43. Cojan I., Fouche O., Lopez S., Rivoirard. J., (2004), «Process-based reservoir modelling in the example of meandering channel», dans: O. Leuangthong and C.V. Deutch, «Geostatistics Banff 2004», Springer, 2005, pp. 611-619.
44. Cressie N., (1990), « The Origins of Kriging », Mathematical Geology, Vol. 22, N°. 3, pp.239-252.
45. Dagbert M., David M., Crozel D., Desbarats A., (1984), « Computing variograms in folded strata-controlled deposits », dans : G. Verly et al., «Geostatistics for natural resources characterization», Reidel, Dordrecht, Holland, pp. 71-89.
46. Dagnelie P., (1975), « Analyse statistique à plusieurs variables », Presses agronomiques de Gembloux, 3ème édition 1982, 362p.

47. Dana D.J., (1977), « Manual of mineralogy », C.S. Hurlbut, Jr. and C. Klein (after James D. Dana). John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., 532 pp.
48. David. M., (1982), « Geostatistical Ore Reserve Estimation » (Developments in Geomathematics 2), 4ème édition, Elsevier, 364p.
49. David. M., (1988), « Handbook of Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation » (Developments in Geomathematics 6), Elsevier, 216p.
50. Deer W.A., Howie R.A., Zussman, J., (1966) « An Introduction to the Rock-Forming Minerals », New York, John Wiley and Sons, 528p.
51. Delineau T., (1994), « Les argiles kaoliniques du bassin des Charentes (France): Analyses typologique, cristallographique, spéciation du fer et applications », Thèse de doctorat (Sous la direction de J. Cases) , Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy.
52. Demirel H., Karapinar N., Ekmekci Z., (1994), « Concentration of low-quality refractory clays », dans : Second International Ceramics Congress, Vol.1: Traditional Ceramics. Istanbul, 24-28 Oct. pp. 98-107.
53. Denis A., Cremoux F., Breyse D., (1997), « Apport d'une approche géostatistique dans l'interprétation des mesures de diagraphies différées », Revue de l'institut français du pétrole, Vol. 52, N° 4 Juillet-Août.
54. Deutsch C., Journel A., (1992), « Geostatistical Software Library and User's Guide », Oxford University Press.
55. Doligez, B. , Ravenne C. , Galli A., Lemouzy P. et groupe HERESSIM, (1992), « Une méthodologie pour une étude intégrée de réservoir des données de puits aux simulations découlement en utilisant les utiles géostatistiques », Institut Française de Pétrole (IFP), Revue petrole est techniques (AFTTP).
56. Dombrowski T., (1993), « Theories of origin for the Georgia Kaolins: A review », dans : H. Murray, Bindy W., Harvey C., « Kaolin genesis and Utilization », Clay Mineral Society Special Publication 1, pp. 75-98.
57. Dowd P.A. Milton D.W., (1987), « Geostatistical estimation of a section of Preserance nickel deposit », pp 23-38, dans : Matheron G., Armstrong A., « Geostatistical case studies », Ridel, 248p.
58. Dubreuilh J., (1987), « Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluviatiles tertiaires du nord du bassin d'Aquitaine, passage aux formations palustres, lacustres et marines », Thèse de doctorat, Université de Bordeaux III, 400p.
59. Dubreuilh J., Marchadour P., Thiry M., (1984), « Cadre géologique et minéralogique des argiles des Charentes, France », Clay Minerals, Vol. 19, pp 29-41.
60. Dubreuilh J., (1982), « Corrélations stratigraphiques entre les dépôts fluviatiles du Siderolithique et Sable du Périgord des Charentes et les formations molasique su Lirbounais », Bulletin du BRGM, N° 4, pp.281-284.

61. Dubreuilh J., (1980), « Corrélations stratigraphiques entre les dépôts continentaux fluviatiles du Sidérolithique des Charentes et les formations molassiques du Libournais », Bull. BRGM (2) I, N° 4, pp. 269-280.
62. Dubreuilh J., Platel J.P., (1980), « Stratigraphie et sédimentologie des formations continentales tertiaires faciès Sidérolithiques des Charentes », Bull. BRGM (2), Vol. I, N° 4, pp. 269-280.

E-H

63. Edward C. J., (1963), « Petrology of the Dry Branch, Georgia, Kaolin Deposits », Symposium on Kaolinite, Clays and Clay Minerals, pp.199-205.
64. Elzea Kogel J., (2002), « Kaolin Mineralogy, Quality, and major Markets », dans: « The Georgia Kaolins: Geology and Utilization », Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Berlin. 256 p.
65. Emery X., (2004), « Simulation conditionnelle de modèles isofactoriels », Thèse de doctorat, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris.
66. Emery X., (2001a), « Géostatistique linéaire », Cours C-166, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris.
67. Emery X., (2001b), « Géostatistique avancée », Cours 167, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris.
68. Esteoule-Choux J., (1981), « Etude en microscopie électronique à balayage de quelques kaolins d'origines différentes : Apports de cette technique pour la compréhension de leur genèses », Clay Minerals, Vol.16, pp 279-288.
69. Fiche Technique, (1998a), « Kaolin », Les Techniques, Minéraux industriels", supplémentaire de revue Mines et Carrières, Nov.1998, pp.112-115.
70. Fiche Technique, (1998b), « Les matières premières pour l'industrie du sanitaire », Les Techniques, Minéraux industriels", supplémentaire de revue Mines et Carrières, Nov.1998, pp.55-64.
71. Galan E., Aparicio P., Gonzalez I., La Iglesia A., (1994), « Influence of associated components of kaolin on the degree of disorder of kaolinite as determined by XRD », dans : « Geologica Carpathica Clays », Vol. 3, N° 2, p. 59-75.
72. Galan E., Aparicio P., Gonzalez I., Miras A., (1998), « Contribution of multivariate analysis to the correlation of some properties of kaolin with its mineralogical and chemical composition », Clay Minerals, Vol.33, N° 1, pp. 65-75.
73. Gamiz E., Melgosa M., Sanchez-Maranon M., Martin-Garcia J.M., Delgado R., (2005), « Relationships between chemico-mineralogical composition and color properties in selected natural and calcined Spanish kaolins », Applied Clay Science, Vol. 28 N° 1-4, pp 269-282.
74. Garcia-Morales M.B., (2003), « Non stationnarité dans les modèles de type booléen, application à la simulation d'unités sédimentaires », Thèse de Doctorat en Géostatistique de l'ENSM

75. Garin P., (1982), « Préparation industrielle des argiles kaoliniques par voie sèche », Bulletin Minéralogie , Vol. 105, pp. 527-533.
76. Gillott J., (1987), « Clay in engineering geology », Elsevier, Amsterdam, 486p.
77. González J.A., Ruiz M.C., (2006), « Bleaching of kaolins and clays by chlorination of iron and titanium », Applied Clay Science, Vol. 33, N° 3-4 August 2006, pp. 219-229.
78. Hack D.R., (2003), « Issues and Challenges in the Application of Geostatistics and Spatial-Data Analysis to the Characterization of Sand-and-Gravel Resources », dans : Bliss J.D., Moyle P.R., Long K.R., « Contributions to Industrial-Minerals Research », Bulletin 2209-J, Department Interior des USA, U.S.G.S.
79. Hanson R.F., Zamora R., Keller W.D., (1981), « Nacrite, Dickite, and Kaolinite in One Deposit in Nayarit, Mexico », Clays and Clay Minerals, Vol. 29, N° 6 December, p. 451-453.
80. He C., Makovicky E., Osbaeck B., (1994), « Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin », Applied Clay Science, Vol. 9, N° 3 September, pp. 165-187.
81. Hetherington L.E., Brown T.J., Benham A.J., Lusty P.A.J., Idoine N.E., (2007), « World Mineral Production 2001–05 », Keyworth, Nottingham British Geological Survey.
82. Holdren G.R., Speyer P.M., (1985), « Reaction rate-surface area relationships during the early stages of weathering. I. Initial observations », Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 49, pp. 675-8.
83. Holm J.L., (2001), « Kaolinites-mullite transformation in different Al₂O₃-SiO₂ systems : Thermo-analytical studies », Phys. Chem. Chem. Phys., N° 3, pp.1362-1365.
84. Hora Z.D., (1998), « Sedimentary Kaolin », dans : «Geological Fieldwork 1997», British Columbia Ministry of Employment and Investment, Paper 1998-1, pp. 24D-1 to 24D-3.
85. Hosseini M.R., Pazouki M., Ranjbar M., Habibian M., (2007), « Bioleaching of iron from highly contaminated Kaolin clay by *Aspergillus niger* », Applied Clay Science, In Press, Corrected Proof, Available online 2 February 2007.
86. Hoyer D.I., Morgan R., « High-Intensity Size Reduction in the Hicom Mill », technical paper, <http://www.hicom-mill.com/papers/paper1.pdf>
87. Hradil D., Hostomsky J.V., (2002), « Effect of composition and physical properties of natural kaolinitic clays on their strong acid weathering rates », Elsevier, CATENA, Vol. 49, N° 1 31 August 2002, pp. 171-181(11)
88. http://www.outokumputechnology.com/pages/Page_7637.aspx
89. Hundert T., Piper D.J.W., Pe-Piper G., (2006), « Genetic Model and Exploration Guidelines for Kaolin Beneath Unconformities in the Lower Cretaceous Fluvial Chaswood Formation, Nova Scotia », Exploration and Mining Geology, January 2006, v. 15, no. 1-2, pp. 9-26.
90. Hurst V.J., Pickering S.M., (1997), « Origin and classification of coastal plain kaolins, Southeastern USA, and the role of groundwater and microbial action », Clays and Clay Minerals 1997, N° 45, pp. 274-285.

91. Hurst V.J., Bosio N.J., (1975), « Rio Capim Kaolin deposits, Brazil », *Economic Geology*, N° 70, pp. 990-992.
92. Hyland D.C., Zhushchikhovskaya I.S., Medvedev V.E., Derevianko A.P., Tabarev A.V., « Pleistocene Textiles in the Russian Far East : Impressions From Some of the World's Oldest Pottery », Mercyhurst College, http://mai.mercyhurst.edu/PDFs/Hylans_Amur.pdf

I-L

93. ICV, (2007), « Déchets et combustible de substitution ; AGS réduit sa facteur énergétique grâce au biogaz », N°1012, mai/juin, p.21.
94. IM, (2006), « Kaolin Magic », *Industrial Minerals* : July 2006, pp 65-66.
95. IM, (2007), *Industrial Minerals* : « Imerys's growth continues », avril 2007, pp.12-14.
96. Isaacs E.H., Srivistava R.M., (1989), « An Introduction to Applied Geostatistics », Oxford University Press, 561pp.
97. Javy C., (1971), « Les argiles : matières premières pour l'industrie, la construction et les travaux publics », BRGM département Géotechniques, rapport N° 71, SGN 381 GTC.
98. Jeong G.Y., Kim H.B., (2003), « Mineralogy, chemistry, and formation of oxidized biotite in the weathering profile of granitic rocks », *American Mineralogist*, February 2003, Vol. 88, N° 2-3, pp. 352-364.
99. Jolicoeur S., Ildefonse P., Bouchard M., (2000), « Kaolinite and Gibbsite Weathering of Biotite within Saprolites and Soils of Central Virginia », *Soil Science Society of America Journal* , Vol .64, pp 1118–1129.
100. Journal A., (1975), « Exploitation des mines, guide pratique de géostatistique », Cours de géostatistique, EMA.
101. Journal A.G., Huijbregts C.J., (1978), « Mining Geostatistic », Academic Press, New York. 600 p.
102. Kaloumenou M., Badogiannis E., Tsivilis S., Kakali G., (1999), « Effect of the Kaolin Particle Size on the Pozzolanic Behaviour of the Metakaolinite Produced », *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 56, N° 2, (September 1999), pp. 901-907.
103. Karapnar N., Ekmekçi Z., Demirel H., (1994), « Separation of Quartz From Clay Minerals by Selective Flocculation », dans : Demirel H., Ersayn S., «Progress in Mineral Processing Technology», 5th International Mineral Processing Symposium, Cappadocia, Turkey, pp. 219-226.
104. Keller W.D., (1978), « Flint-clay facies illustrated within one deposit of refractory clay », *Clays and Clay Minerals*, Vol. 26, N° 3, pp. 237-243.
105. Keller W.D., (1977), « Scan electron micrographs pf kaolins collected from diverse environments of origin : V- Kaolins collected in Australia and Japan », *Field trips on the sixth*

- and seventh clay conferences, Pergamon Press 1977, Clays and Clay Minerals, Vol. 25, pp. 347-364.
106. Keller W.D., (1976a), « Scan electron micrographs of kaolins collected from diverse environments of origin- I », Clays and Clay Minerals, Vol. 24, pp.107-113.
107. Keller W.D., (1976b), « Scan electron micrographs of kaolins collected from diverse environments of origin- II », Clays and Clay Minerals, Vol. 24, pp.114-117.
108. Kesler T.L., (1956), « Environment and origin of the Cretaceous kaolin deposits of Georgia and South Carolina », Economic Geology, Vol. 51, pp. 541-554.
109. Kim Y.C., Martino F., Chopra I.K., (1981), « Application of Geostatistics in a Coal Deposit », Mining Engineering, Vol. 31, N° 10 Oct.1981, pp 1476-1481.
110. King L., (2006), « Ball clays dig deep », Industrial Minerals, May 2006, pp 30-39.
111. Klingebiel A., (1966), «Etude sédimentologique du paléogène Nord-Aquitain : Interprétation litho-stratigraphique et paléogéographique», Université de Bordeaux, 298 p.
112. Kristof E., Zoltan Juhasz A., Vassanyi I., (1993), « The effect of mechanical treatment on the crystal structure and thermal behavior of kaolinite », Clays and Clay Minerals, Vol. 41, N° 5, pp 608-512.
113. Kulbicki G., (1953), «Les condition de cristallisation des minéraux kaoliniques dans les sidérolithiques d'aquitaine», Compte rendues de l'Académie des Sciences, Tome 237, pp. 194-196.
114. Lanquine A., Halm L., (1951), «Sur la présence et les conditions de gisement d'argiles mégalumineuses dans le Sidérolithique du Bassin d'Aquitaine», C.R. Acad. Sci. Paris 232, 1572-1574.
115. Larroyd F., Petter C.O., Sampaio C.H., (2002), « Purification of north Brazilian kaolin by selective flocculation », Minerals Engineering, Vol.15, N° 12 December, pp. 1191-1192.
116. Lantuéjoul C., (2002), « Geostatistical simulation, Models and algorithms», Springer Verlag, Heidelberg, ISBN 3-540-42202-1. 256 p.
117. Lee E.Y., Cho K.S., Ryu H.W., Chang Y.K., (1999), « Microbial removal of Fe(III) impurities from clay using dissimilatory iron reducers », Journal of Bioscience and Bioengineering, Vol. 87, pp397-399.
118. Liétard, O., (1977), «Contribution à l'étude des propriétés physico-chimiques, cristallographiques et morphologiques des kaolins», Thèse de Doctorat ès-Sciences, Univ. de Nancy, France.
119. Lima de Sousa D., (2005), « Etude pétrologique et cristallochimique du kaolin de la Rivière Capim pour implications industrielles », Thèse de doctorat, RP2E, Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy.

120. Liu X., Hu N., Zhang H., Ha C., Yang Z., (2005), « Effects of modified kaolin on the crystallization property of PP/Kaolin nanocomposites », Science in China. Series B. Chemistry, Vol. 48, N° 4, pp. 326-333.
121. Löhle I., (2007), icv (L'industrie céramique & verrière), La SIM, N°1012, mai/juin, pp 25-27.
122. Lopez S., (2003), «Modélisation de Réservoirs Chenalisés Méandriques une Approche Génétique et Stochastique», Thèse de Doctorat en Géostatistique / Géologie des Bassins Sédimentaires, Centre de Géostatistique, ENSMP.
123. Loughnan F C., (1978), « Flint clays, tonsteins and the kaolinite clayrock facies », Clay Minerals, Vol.13, pp 387-400.

M-P

124. Macías Vázquez, F., (1981), « Formation of gibbsite in soils and saprolites of temperate-humid zones », Clay Minerals, Vol.16, pp. 43-52.
125. Makiewicz A., Ratajczak W., (1993), « Principal components analysis (PCA) », Computers & Geosciences, Vol.19, N° 3 March 1993, pp 303-342.
126. Malmström M., Banwart S., Lewenhagen J., Duro L., Bruno J., (1996), « The dissolution of biotite and chlorite at 25°C in the near neutral pH region », J. Cont. Hydrol., Vol.21, pp.201-213.
127. Manning D.A.C., (1995), « Introduction to industrial minerals », Chapman and Hall, Cambridge University Press.
128. Marchadour P., (1980), « Kaolinites du bassin des Charentes : Variations des caractères minéralogiques avec mes milieux de dépôt», Travail d'option de la science de la terre, CGGM, ENSMP.
129. Marcotte D., « Cours GLQ3402 : Traitement statistique des données géologiques », laboratoire de Géophysique et Géostatistique de l'École Polytechnique de Montréal, <http://geo.polymtl.ca/~marcotte/glq3402.html>
130. Marcotte D., « Cours GLQ3401 : Géostatistique minière», laboratoire de Géophysique et Géostatistique de l'École Polytechnique de Montréal, <http://geo.polymtl.ca/~marcotte/glq3401geo.html>
131. Marshall C.E., (1962), « Reactions of feldspars and micas with aqueous solutions », Economic Geology, Vol. 57, N° 8, pp. 1219-1227.
132. Martinelli L.A., Victoria R.L., Devol A.H., Richey J.E., Forsberg B.R., (1989), « Suspended sediment load in the Amazon basin: An overview », GeoJournal , Vol. 19, N° 4/December, pp. 381-389.

133. Matheron G., (1973), «The intrinsic random functions and their applications», *Advances in Applied Probability*, 5, pp. 439-468.
134. Matheron G., (1972), «The turning bands: a method for simulating random functions in R^n », rapport N-303, Fontainebleau: Centre de Géostatistique et de Morphologie Mathématique, Ecole des Mines de Paris.
135. Matheron G., (1970), « La théorie des variables régionalisées et ses application », Centre de géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, C-48.
136. Matheron G., Marechal A., (1969), «Note sur la probabilité de succès dans une reconnaissance aveugle», Rapport N-109, CG, Ecole des Mines de Paris.
137. Matheron G., (1965), «Les variables régionalisées et leur estimation : une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature», Paris, Masson. 306 p.
138. Matheron G., (1962), «Traité de géostatistique appliquée», Technip, France.
139. McArthur G.J., (1988), « Using geology to control geostatistics in the Hellyer deposit », *Journal Mathematical Geology*, Springer Netherlands , Vol. 20, N° 4 May, pp. 343-366.
140. McCammon, R.B., (1977), « Target intersection probabilities for parallel-line and continuous grid types of search», *Mathematical Geology*, Vol. 9(4), pp. 369-382.
141. Meunier A., (2006), « Why are clay minerals small ? », *Clay Minerals*, Vol. 41, N° 2, pp. 551-566.
142. Mestdagh M. M., Vielvoye L., Herbillon A.J., (1980), « Iron in kaolinite, II : The relationship between kaolinite crystallinity and iron content », *Clay Minerals* vol. 15, pp. 1-13.
143. Milheiro F.A.C., Frerie M.N., Silva A.G.P., Holanda J.N.F., (2005), « Densification behavior of a red firing Brazilian kaolinitic clay », *Ceramics International*, Vol. 31, pp.757-763.
144. Millot G., (2002), « Argiles et minéraux argileux », Dans : *Encyclopédie Universalis*, pp. 929-934.
145. Millot G., (1964), «Géologie des argiles», Masson et Cie éd., Paris, 499 p.
146. Montes C.R., Melfi A.J., Carvalho A., Viera-Coelho A.C., Formoso M.L.L., (2002), « Genesis, mineralogy and geochemistry of kaolin deposits of the Jari River, Amapá State, Brazil », *Clays and Clay Minerals*, Vol.50, N°.4, pp. 494-503.
147. Mosser P.C., (1982), « Eléments traces associés aux kaolinites des Charentes », *Bulletin de Mineralogie*, N° 105, pp. 425-429.
148. Murakami T., Utsunomiya S., Yokoyama T., Kasama T., (2003), « Biotite dissolution processes and mechanisms in the laboratory and in nature : Early stage weathering environment and vermiculitization », *American Mineralogist*, February 2003, Vol. 88, N° 2-3, pp. 377-386.

149. Murphy, S.F., (1995), « Weathering of biotite in a tropical forest soil, Luquillo mountains, Puerto Rico », Unpublished masters Thesis, Pennsylvania State University Department of Geosciences, 100 p.
150. Murphy S.F., Brantley S.L., Blum A.E., White A.F., Dong H., (1998), « Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico: II. Rate and mechanism of biotite weathering », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 62, N° 2, pp. 227-243.
151. Murray, H.H., Keller, W.D., (1993), « Kaolins, Kaolins and Kaolins », dans : Murray H., Bundy W., Harvey C., «Kaolin Genesis and Utilization», Clay Mineral Society Special Publication 1, pp.1-24.
152. Murray H.H., Partridge P., (1982), « Genesis of rio Jarin kaolin », dans : Van Olphen H., Veniale F., «Developments in Sedimentology», Elsevier, Amsterdam 35, pp.279-291.
153. Murray H.H., (1980), « Major Kaolin Processing Developments », *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 7, pp. 263-274.
154. Murray H.H., (1999), « Applied clay mineralogy today and tomorrow », *Clay Minerals*, N° 34, pp. 39-49.
155. Murray H.H., Harvey C., Smith J.M., (1977), « Mineralogy and geology of the Maungaparerua halloysite deposit in New Zealand », *Clays and Clay Minerals*, Vol. 25, N° 1, pp. 1-5.
156. Murray H.H., (2000), «Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview » , *Applied Clay Science*, Vol. 17, N° 5-6 : November 2000, pp. 207-221.
157. Negroni J.M., (2003), « Stratégie de la reconnaissance : Prospection et évaluation des argiles kaoliniques du bassin des Charentes », Cours, Centre de developement des geosciences appliquées, Université Bordeaux I.
158. Newns A., Pascoe R. D., (2002), « Influence of path length and slurry velocity on the removal of iron from kaolin using a high gradient magnetic separator », *Minerals Engineering*, Vol. 15, N° 6, June 2002, pp. 465-467.
159. Noppé M.A., (1994), « Practical geostatistics for on-site analysis – a coal example », Paper in Proceedings of the Mining Geostatistics Conference, Geostatistical Association of South Africa, Kruger.
160. öster R., Schreck B., Rybinski W., Dobiás B., (1992), « New reagent systems for the flotation of kaolinite », *Minerals Engineering*, Vol. 5, N° 3-5 : March - May 1992, pp. 445-456.
161. Peroni R., Costa J.F., Koppe J.C., Petter C.O., (1999), « A novel methodology for modeling kaolian deposits, in Dagdelen, Kadri », dans : International Symposium on Computer Applications in the Minerals Industries.
162. Phang C., Wildman J., Anand R., (2004), « Post-depositional weathering features and processes in sediments- based on selected sites in Australia », Roach I.C. *Regolith 2004*. CRC LEME, pp. 273-275.

163. Pickering, S.M., Hurst, V.J., (1989), «Commercial Kaolins in Georgia. Occurrence, Mineralogy, Origin and Uses». Geol. Soc. Guidebooks 9, pp.29-75.
164. Pickering, S.M., (2002), « Commercial kaolin processing », dans: « The Georgia Kaolins: Geology and Utilization », Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Berlin. 256 p.
165. Plaçon A., Zacharie C., (1990), « An expert system for the structural characterization of kaolinites », Clay Minerals, Vol. 25, pp. 249-260.
166. Pradip Kulkarni R.A., Gundiah S., Moudgil B.M., (1991), « Selective flocculation of kaolinite from mixtures with tribasic calcium phosphate using hydrolyzed polyacrylamides », International Journal of Mineral Processing, Vol. 32, N° 3-4 : September 1991, pp. 259-270.
167. Prola L., Dobenecker B., Kienzle E., « Interaction between Dietary Cellulose Content and Food Intake in Cats », The Journal of Nutrition, Vol. 136, pp.1988S-1990S.

Q-T

168. Rahimi A., Matin M., (1989), « Technology of Cermics », Khak e Chini d'Iran Co., 2 tomes, 572p. (En persan).
169. Ravishankar S.A., Pradip Khosla N.K., (1995), « Selective flocculation of iron oxide from its synthetic mixtures with clays : a comparison of polyacrylic acid and starch polymers », International journal of mineral processing, Vol. 43, N° 3-4, pp. 235-247.
170. Rebertus, R.A., Weed S.B., Buol S.W., (1986), «Transformations of biotite to kaolinite during saprolite-soil weathering», SSAJ (Soil Sciences Society of America Journal), Vol°50, pp. 810–819.
171. Reynolds R.C., Bish D.L., (2002), « The effects of grinding on the structure of a low-defect kaolinite », American Mineralogist, Vol. 87, pp. 1626–1630.
172. Rivoirard J., (2003), « Cours de géostatistique multivariable », Cours C-172, CG, Ecole des Mines de Paris.
173. Robert M., (1973), « The experimental transformation of mica toward smectite : relative importance of total charge and tetrahedral substitution », Clays and Clay Minerals, Vol. 21, pp.167-174.
174. Roskill, (1993), « The economic of kaolin », Roskill Information Services, 440p.
175. Roskill, (2006), « The economic of kaolin », Roskill Information Services.
176. Sahin A., Ghorri S.G, Ali A., ZEI-Sahn. H.F., Hassan H.M., Al-Sanounah A., (1998), « Geological Controls of Variograms in a Complex Carbonate Reservoir, Eastern Province, Saudi Arabia », Journal of Mathematical Geology, Springer Netherlands, Vol.30, N° 3, pp. 309-322.

177. Saikia K., Sarkar B.C., (2006), « Exploration drilling optimisation using geostatistics : a case in Jharia Coalfield, India », Institute of Materials, Minerals and Mining and The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B), Vol. 115, N° 1, pp 13-22.
178. Santos Jr., Rossetti D.F., Murray H.H., (2007), « Origins of the Rio Capim kaolinites (northern Brazil) », Applied Clay Science, In Press, Corrected Proof, Available online 24 January 2007.
179. Santos Jr., Rossetti D.F., (2006), « Depositional model of Ipixuna formation (late cretaceous ?- early tertiary), Rio-Capim area, northern Brazil », Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis , Vol. 13(2), pp. 65-87.
180. Schofield, C.G., (1980), « Homogenisation/Blending Systems Design and Control for Minerals Processing », Trans Tech Publications, 321p.
181. Scholze H., (1980), « Le verre, nature structure et propriétés », Institut du verre, Paris, 2ème édition, 364p.
182. Schulz Jr., (2000), « Kaolin exploration in the Capim river region - state of para », Ministério de Minas e Energia do Brasil, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Diretoria de Geologia e Recursos Minerais.
183. Sennett P.Y., Raymond H., (1978), « Current problems in beneficiation of kaolin clay » dans : Somasundaran P., Arbiter N., « Fine Particle Beneficiation », Ch.8, pp. 135-137.
184. Shelobolina E.S., Pickering S.M., Lovley D.R., (2005), « Fe-Cycle bacteria from industrial clays mined in Georgia, USA », Clays and Clay Minerals 2005, Vol. 53, pp. 580-586.
185. Sibbald I.R., Slinger S.J., Ashton G.C., (1960), « The Weight Gain and Feed Intake of Chicks Fed a Ration Diluted with Cellulose or Kaolin », The Journal of Nutrition. Vol.72, pp. 441-446.
186. Sinclair, A.J., (1975), «Some considerations regarding grid orientation and sample spacing», Vancouver International Geochemical Exploration Symposium, pp. 133-140.
187. Singer F., Singer S.S., (1963), « Industrial ceramics », Chapman & Hall
188. Singer D.A., Wickman F.E., (1969), «Probability tables for locating elliptical targets with square, rectangular, and hexagonal point-nets», The Pennsylvania State University, Earth and Mineral Sciences Experiment Station, Special Publication 69-1, 100 p.
189. Sonnier R., (2006), « Recyclage des pneus : incorporation de poudrette pneus usagés dans une matrice polyéthylène », Thèse de doctorat, Université Montpellier II,
190. Soro N.S., (2003), « Influence des ions fer sur les transformations thermiques de la kaolinite », Thèse de Doctorant, (Responsable : J.P. Bonnet, J.M. Gaillard, P. Blanchart), Le Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes (GEMH), ENSCI Limoges.
191. Stangler R.L., Strieder A.J., Koppe J.C., Costa J.F., Armstrong M., (2002) « Geostatistical Framework for Modelling Clay Deposits : Nova Veneza Case Study in Southern Brazil », dans: Armstrong, Bettini, Champigny, Galli , Remacre, «Rio2000 : Proceedings of the Geostats, Sessions of the 31IGC», Dordrecht, Holland.

192. Styriaková I., Bhatti T.M., Bigham J.M., Tyriak I., Vuorinen A., Tuovinen O.H., (2004), « Weathering of phlogopite by *Bacillus cereus* and *Acidithiobacillus ferrooxidans* », *Canadian Journal of Microbiology*, Vol. 50, N° 3, pp. 213-219(7).
193. Styriakova I., Styriak I., Nandakumar M.P., Mattiasson B., (2003), « Bacterial destruction of mica during bioleaching of kaolin and quartz sands by *Bacillus cereus* », *Kluwer, world Journal of Microbiology & Biotechnology*, Vol.19, pp 583-590.
194. Taboada J., Rivas T., Saavedra A., Araújo M., Argüelles A., (2006), « A fuzzy expert system application to the evaluation of ceramic- and paper-quality kaolin », *Applied Clay Science*, Volume 33, Issues 3-4, August 2006, Pages 287-297.
195. Taylor L., (2006), « Kaolin's paper chase », *Industrial Minerals* July 2006, pp 33-34.
196. Thiry M., Simon-Coinçon R., Quesnel F., Wyns R., (2005), « Altération bauxitique associée aux argiles à chailles sur la bordure sud-est du bassin de Paris », *Bull. Soc. géol. Fr.*, Vol. 176, N° 2, pp. 199-214.
197. Thiry M., (2003), « Stratigraphic scale of the geodynamic and climatic events in continental realm. », *Proceedings of the meeting Paleoweathering and Paleosurfaces in the Ardennes-Eifel region* ", Preizerdau (Luxembourg), 14-17 may, *Géologie de le France*, 1, pp. 3-9.
198. Thiry M., Audebert M., (1996), « Les argiles plastiques de Provins : Sédimentation et resource naturelle » *Bulletin pédagogique trimestriel, Biologie – Géologie*, N°1, pp. 153-173.
199. Tourlière B., Perrin J., Le Berre P., Pasquet J.F, (2003), « Use of airborne gamma-ray spectrometry for kaolin exploration, *Journal of Applied Geophysics* », Vol. 53, N° 2-3, pp. 91-102.
200. Trauth, M. H., (2006), *MATLAB® Recipes for Earth Sciences*, Springer, XII, 238 p.
201. Trckova M., Maltova L., Dvorska L., Pavlik I., (2004), « Kaolin, bentonite, and zeolites as feed supplements for animals: health advantages and risks », *Veterinary Research Institute, Brno, Czech Republic ,Vet. Med. – Czech*, 49, 2004 (10), pp. 389–399
202. Une introduction aux processus sédimentaires, Université de Liège, Faculté des Sciences, Département de Géologie, <http://www.ulg.ac.be/geolsed/processus/processus.htm>
203. United States Patent 5397754, « Method of brightening kaolin clay by thermal oxidative decarboxylation of organic contaminants »
204. <http://www.freepatentsonline.com/5397754.html>
205. Uotokumpo Technolgy, Superconducting HGMS.

U-Z

206. Velde B., (1985), « Clay minerals, A physico - chemical explanation of their occurrence», Elsevier, New York, 427p.

207. Vigneaux M., (1975), « Guides Geologiques regionaux : Aquitaine Occidentale », BRGM, 221 p.
208. Vouillemet M., (1998), « Les matières premières pour l'industrie du sanitaire », Mines et Carrières, SIM, Les techniques III-IV/98, Supplémentaire à Nov.1998.
209. Wackernagel H., (1995), « Multivariate geostatistics : an introduction with applications ». Springer.
210. Weaver C.E., (1989), « Clay, muds, and shale ». Developments in sedimentology 44, Elsevier, 820p.
211. Wills B.A., (1992), « Mineral Processing Technology », 5ème Edition, Pergamon, 855p.
212. Wilson I., (2007), « Chinese sanitaryware flushed with export success », IM ; Industrial Mineral May.2007, pp.30-39.
213. Wilson I., (2006), « Engineered Kaolin », IM , Industrial Mineral Oct.2006, pp.36-42.
214. Wilson I.R., De Souza Santos H., De Souza Santos P., (2006), « Kaolin and halloysite deposits of Brazil », Clay Minerals, Vol. 41, N°3, pp 697-716.
215. Wilson I.R., (2004), « Kaolin and halloysite deposits of China », Clay Minerals (2004) Vol.39, pp 1-15.
216. Wilson M.J., (1986), « Mineral weathering processes in podzolic soils on granitic minerals and their implications for surface water acidification », Journal of the geological society, 143. pp. 691-697.
217. Yoon R.H., Nagaraj D.R., Wang S.S., Hildebrand T.M., (1992), « Benefication of kaolin clay by froth flotation using hydroxamate collectors », Minerals Engineering, Vol. 5, Issues 3-5, March-May 1992, pp. 457-467.
218. Yuan, J., Murray, H.H., (1993), «Mineralogical and physical properties of the Maoming Kolin from Guandong Province, South China», Clay Mineral Society Special Publication 1, 249-260.
219. Yuan J., (2002), « Origin of the Georgia-South Carolina Commercial-grade Kaolins », The Georgia Kaolins, Geology and Utilisation, Elzea Kogel J. et al. SME.
220. Yvon J., Cases J.M., Lietard O., Grain P., Lhote F., (1980), « Influence des propriétés des charges kaoliniques sur les performances des caoutchoucs naturels charges », Clay Minerals, Vol.15, pp. 351-368.